

**TÉCNICAS DE CONTROL CLÁSICO CON TEMPERATURA EXTERNA EN
SISTEMAS DE AIRE ACONDICIONADO TIPO MINI-SPLIT**

Luis David Díaz Charris



UNIVERSIDAD DE LA COSTA CUC

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

BARRANQUILLA

2018

**TÉCNICAS DE CONTROL CLÁSICO CON TEMPERATURA EXTERNA EN
SISTEMAS DE AIRE ACONDICIONADO TIPO MINI-SPLIT.**

Luis David Díaz Charris

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar el título de:

INGENIERO ELECTRÓNICO

Director: MSc. (c) Heyder David Páez Logreira

Codirector: Ing. Elkin Ramírez Cerpa

UNIVERSIDAD DE LA COSTA, CUC.

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

BARRANQUILLA

2018

Nota de aceptación

Firma del Jurado 1

Firma del Jurado 2

Barranquilla, febrero de 2018

Dedicatoria

A mi hijo Tomás David, mi sonrisa.

A María Helena, un regalo inesperado.

A Yuranys, mi preciosa esposa.

A Luz Fabiola, mi madre luchadora.

A Dayana, mi hermana rebelde.

A Laudith, mi arquitecta favorita.

A Fania, que siempre gana en silencio.

A Cristian David, cuya inteligencia es diferente.

A Cristian, mi tío y padre.

A Ana Isabel, la paciencia hecha abuela.

A Fermín, de quien heredé cosas buenas.

Agradecimientos

Agradezco

A Dios Padre Todo Poderoso, por su guía y misericordia en cada momento de mi vida.

A mi esposa por ser tan insistente, compasiva en los momentos en que creí estar vencido, y por traer al mundo a nuestros hijos.

A mi Madre por tantos años de lucha incansable y por enseñarme la lección del trabajo duro.

A Heyder Páez Logreira por su guía en el desarrollo de este proyecto y, sobre todo, por su amistad.

Resumen

Los sistemas de aire acondicionado (AC), son tecnologías desarrolladas para brindar confort térmico en un recinto cerrado. Las altas temperaturas del medio ambiente (temperatura externa) afectan el funcionamiento de un sistema AC, generando sobreesfuerzo en el sistema, incluso cuando éste no puede alcanzar el valor deseado de temperatura (set-point). Este sobreesfuerzo ocasiona que el sistema consuma más energía sin lograr su objetivo. En el estado actual de la literatura se evidencia que la temperatura externa es un factor poco utilizado para mejorar la eficiencia en sistemas de AC. Por consiguiente, el presente trabajo realiza la implementación de dos técnicas de control clásico: Lineal y PI, que incluyen la temperatura externa como variable del lazo de control. El sistema de control que aquí se diseña es aplicado a un sistema AC tipo mini-split, para verificar el consumo energético al aplicar estas técnicas de control.

Palabras Clave: Ahorro energético, eficiencia, Aire Acondicionado, Control, Monitoreo

Abstract

The air conditioning systems (AC), are technologies developed to provide thermal comfort in a closed room. The high temperatures of the environment (external temperature) affect the operation of an AC system, generating overexertion in the system, even when it cannot reach the desired temperature value (set-point). This overexertion causes the system to consume more energy without achieving its objective. In the current state of the literature it is evident that the external temperature is a little used factor to improve the efficiency in AC systems. Therefore, the present work realizes the implementation of two classic control techniques: Linear and PI, which include the external temperature as variable of the control loop. The control system that is designed here is applied to a mini-split type AC system, to verify the energy consumption when applying these control techniques.

Keywords: Energy saving, efficiency, air conditioning, control, monitoring

Contenido

Dedicatoria.....	4
Agradecimientos	5
Resumen	6
Abstract.....	7
Contenido	8
Lista de Tablas y Figuras.....	11
Introducción.....	14
El problema	16
1. Planteamiento del problema	16
2. Objetivos de la investigación.....	18
2.1. Objetivo General	18
2.2. Objetivos Específicos	18
3. Justificación de la investigación	19
4. Delimitación de la investigación	21
4.1. Delimitación espacial	21
4.2. Delimitación temporal.....	21
Marco teórico.....	22
5. Antecedentes de la investigación.....	22

5.1. Técnicas de control en HVAC con variables internas del recinto.....	24
5.2. Técnicas de control en HVAC con variables externas al recinto.	29
6. Referentes Teóricos	32
6.1. Sistemas de Aire acondicionado	32
6.2. El Ciclo de Refrigeración.....	33
6.3. Clasificación de los sistemas de aire acondicionado.....	34
6.4. Sistemas de control.....	44
6.5. Plataformas de desarrollo	47
6.6. Técnicas para el análisis de datos.....	57
Marco metodológico.....	59
7. Tipo, enfoque y alcance de la investigación.....	59
8. Diseño de la investigación.....	60
8.1. Análisis del estado de la literatura.....	60
8.2. Desarrollo de las técnicas de control.....	60
8.3. Evaluación del consumo energético	62
Desarrollo	63
9. Desarrollo de la solución	63
9.1. Selección del aire acondicionado	63
9.2. Consideraciones del análisis de la literatura	63

9.3. Arquitectura de la solución.	64
9.4. Desarrollo del sistema de control	65
Resultados.....	76
10. Análisis y discusión de los resultados.....	76
10.1. Análisis del estado de la literatura.....	76
10.2. Sistema de control	79
10.3. Verificación del consumo energético	87
Conclusiones.....	89
Referencias	91

Lista de Tablas y Figuras

Tablas

Tabla 5.1 Criterios de calidad.....	22
Tabla 6.2 Características técnicas del sensor DHT11.	53
Tabla 7.3 Datos metodológicos.	59
Tabla 9.4 Características del AC seleccionado	63
Tabla 10.5 Datos técnicos revisión de la literatura.....	77
Tabla 10.6. Resumen del Análisis RLS entre la temperatura externa y la interna.	81
Tabla 10.7. Resumen del Análisis RLS entre la temperatura externa y la corriente.	82

Figuras

Figura 1.1 Ciclo de refrigeración.....	16
Figura 5.2 Variables utilizadas en investigaciones para la eficiencia de sistemas AC.	23
Figura 6.3 Ciclo de refrigeración.....	33
Figura 6.4 Sistema AC Auto-contenido para interiores (de ventana).	38
Figura 6.5 Sistema AC Auto-contenido para interiores (tipo torre).....	38
Figura 6.6 Sistema AC Auto-contenido para exteriores (montaje techo).....	39
Figura 6.7 Sistema AC Simple Split o Mini-Split.....	40
Figura 6.8 Sistema AC Multi-Split.....	41
Figura 6.9 Sistema AC de Flujo Variable de Refrigerante VRF.....	41
Figura 6.10 Esquema de un sistema AC Todo Aire.	42
Figura 6.11 Esquema de un sistema AC Todo Agua.....	43
Figura 6.12 Representación de un sistema de control de lazo abierto.....	44

Figura 6.13 Representación de un sistema de control de lazo cerrado.....	45
Figura 6.14. Vista inicial del entorno de programación Arduino.....	49
Figura 6.15 Placa Arduino Mega 2560.....	51
Figura 6.16 Sensor DHT11.....	52
Figura 6.17 Sensor de corriente ECS1030L72	54
Figura 6.18 Sensor de voltaje AC Zmpt101b.....	54
Figura 6.19. Dataloggin Shield.....	56
Figura 6.20. Módulos principales del Datalogger Shield	56
Figura 9.21 Arquitectura de la solución.	64
Figura 9.22 Diagrama de la función de monitoreo	66
Figura 9.23 Lógica de la función de monitoreo.....	67
Figura 9.24 Circuito de acoplamiento del sensor de corriente	68
Figura 9.25 Circuito de acoplamiento sensor de tensión.....	70
Figura 9.26. Arquitectura de la técnica de control Lineal	73
Figura 9.27. Arquitectura de la técnica de control PI.....	73
Figura 9.28. Circuito Actuador IR.....	74
Figura 9.29. (a) Emisor IR. (b) Receptor-decodificador IR	75
Figura 10.30. Prototipo.....	79
Figura 10.31. Resultados del Monitoreo inicial	80
Figura 10.32. Esquema del Controlador Lineal.....	84
Figura 10.33. Comportamiento del sistema al aplicar Control Lineal.....	85
Figura 10.34. Esquema del controlador PI.	86
Figura 10.35. Comportamiento del sistema al aplicar Control PI.	86

Figura 10.36. Verificación del Consumo energético..... 87

Figura 10.37. Comparación entre técnicas de control. 88

Introducción

Los sistemas de aire acondicionado (AC) son equipos utilizados para climatizar el ambiente de un recinto. Estos sistemas emplean el principio termodinámico de la transferencia de calor. La transferencia de calor ocurre desde zonas de mayor temperatura hacia zonas de menor temperatura. El funcionamiento y la eficiencia de un sistema AC, en perfectas condiciones, depende de muchos factores, entre los cuales se encuentran: la temperatura y humedad del lugar a climatizar (temperatura interna), y la temperatura y humedad externa a este lugar (temperatura externa).

Cuando la temperatura externa es demasiado alta, alcanzar la temperatura deseada por el usuario (set-point) requiere mayor trabajo del sistema AC. En este caso, el sistema trabaja constantemente, ocasionándose un consumo innecesario de energía.

En la literatura actual sobre control de sistemas AC, se evidencia un amplio desarrollo de dispositivos automáticos para el uso eficiente de la energía (Preglej et al., 2014; Soyguder & Alli, 2009; Zhangjun, 2011). Sin embargo, también salta a la vista la poca exploración en sistemas de control que permitan la toma de decisiones y ajustes automáticos según el comportamiento de la temperatura externa. En este trabajo se tiene en cuenta la temperatura externa y, a partir del estado de esta variable, se ejercen acciones de control sobre el sistema AC, para luego verificar el consumo energético al aplicar un control externo. Este trabajo es una oportunidad de investigación en el desarrollo de tecnologías limpias, aplicables y repetibles, para impactar positivamente en el ámbito social, económico y ambiental del planeta.

Este documento se organiza de la siguiente manera: *I) El Problema:* en esta sección se plantea el problema de estudio, los objetivos, la justificación, y la delimitación espacial y temporal de la investigación. *II) Marco teórico:* aquí se presentan algunos antecedentes consultados en la literatura actual sobre control en sistemas AC, y también referentes teóricos sobre los que se fundamenta la investigación. *III) Marco Metodológico:* se describen los métodos usados para la elaboración de las herramientas de investigación, como la selección de la literatura y la organización y revisión de esta; la selección de las herramientas para elaboración de los desarrollos de hardware y software. *IV) Desarrollo:* en esta sección se describe la arquitectura de la solución, así como las consideraciones técnicas y el diseño del prototipo. *V) Resultados:* Aquí se encuentran los resultados obtenidos y el análisis realizado a partir de la aplicación de la investigación. *VI) Conclusiones:* en esta sección se presentan las conclusiones de los resultados obtenidos y la ratificación de que se lograron los objetivos planteados.

El problema

1. Planteamiento del problema

La transferencia de calor en un sistema de AC se denomina ciclo de refrigeración y se divide en 4 procesos: expansión, evaporación, compresión y condensación. En este ciclo intervienen cuatro componentes básicos de un sistema de refrigeración: líquido refrigerante, compresor de vapor, condensador de vapor, y válvulas de expansión y evaporación(Whitman & Jhonson, 2006).

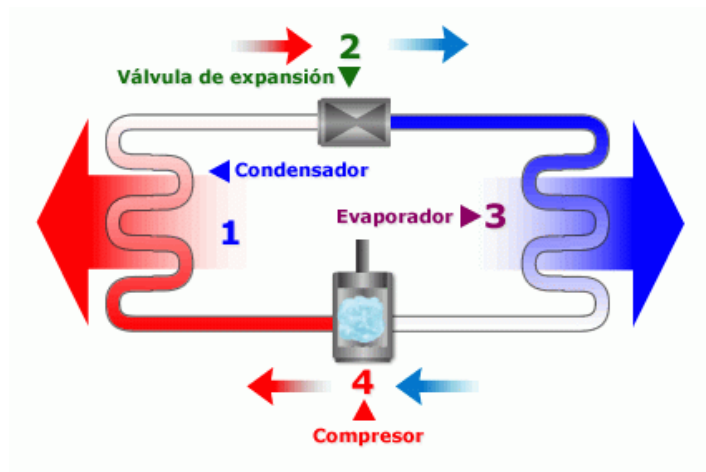


Figura 1. Ciclo de refrigeración. Fuente: ("El Ciclo de Refrigeración - Cómo Funciona," n.d.)

El ciclo consiste en extraer aire caliente del recinto a climatizar y ponerlo en contacto con el evaporador. En este paso se da la expansión del refrigerante, el cual se encuentra en estado líquido. El refrigerante recibe el calor del recinto y cambia a estado gaseoso. El refrigerante en estado gaseoso es conducido al condensador, donde entra en contacto con el exterior y vuelve al estado líquido, para luego reiniciar el ciclo (Mirinejad, Welch, & Spicer, 2012).

Muchos factores inciden en la eficiencia de un sistema de AC: el mantenimiento, la hermeticidad del recinto y las condiciones de la fuente de energía. Sin embargo, la temperatura del medio ambiente o externa es un factor poco considerado en el uso de sistemas de AC que influye notablemente en el consumo energético del sistema y el nivel de confort que este ofrece (Lu, Cai, Xie, Li, & Soh, 2005).

Un ambiente con condiciones climáticas de alta temperatura afecta a los sistemas de AC, tal como sucede en la ciudad de Barranquilla. Cuando la temperatura externa es alta, los usuarios del sistema demandan una mayor producción de frío del sistema. Esto propicia sobreesfuerzo en el sistema, debido a que el refrigerante entra en contacto con el medio ambiente durante el ciclo de refrigeración. En la última etapa del ciclo, el refrigerante le transfiere calor al ambiente externo, en consecuencia, no se puede transferir todo el calor del recinto hacia el medio ambiente. Finalmente, el sistema y el recinto no alcanzan la temperatura deseada, el sistema no realiza tiempos de reposo y se ocasionan consumos adicionales de energía (Yang & Wang, 2012).

Por tanto, cabe realizarse la siguiente pregunta:

Los métodos de control clásico, Lineal y PI, ¿permiten reducir el consumo energético en un sistema de AC y conservar el nivel de confort del usuario?

De lo anterior, surge este otro interrogante:

¿Cuál de los dos tipos de control aplicados puede usarse para mejorar la eficiencia de un sistema AC tipo Mini-Split?

2. Objetivos de la investigación

2.1. Objetivo General

Implementar dos técnicas de control clásico involucrando la temperatura externa para verificar la eficiencia en un sistema de aire acondicionado tipo mini-split.

2.2. Objetivos Específicos

- Analizar el estado de la literatura en técnicas de control que involucren la temperatura externa para sistemas de aire acondicionado (AC).
- Desarrollar técnicas de control clásico, Lineal y PI, sobre un sistema de aire acondicionado tipo mini-split que incorporen la temperatura externa.
- Evaluar el consumo energético al aplicar las técnicas de control en un aire acondicionado mini-split.

3. Justificación de la investigación

En su trabajo, Galvéz-Arocha, Quiroga-Mendez, Barajas-Merchan, & Gómez-Sarmiento, (2012), proponen la implementación de diversos tipos de control en un sistema de aire acondicionado (AC), destacando las ventajas en el uso eficiente de la energía que posee cada uno. La presente investigación considera la temperatura externa en el lazo de control, en contraste con el trabajo de Galvéz-Arocha, et al. (2012) donde la temperatura externa es considerada constante para que no afecte las pruebas realizadas. Al tener en cuenta la temperatura externa se orienta los intentos investigativos hacia enfoques poco frecuentes, abriendo espacios a nuevas soluciones en sistemas de AC.

Por otra parte Zhu, Yang, & Lu (2013) implementan el modelo de un controlador predictivo para adaptar un sistema de aire acondicionado a casi cualquier ambiente de trabajo. Considerando que las condiciones climáticas afectan las acciones del controlador y que el consumo energético se ve afectado por esta variable. En el trabajo de Zhu, et al. (2013) se ejerce control directo sobre un compresor del sistema de AC, variando su frecuencia de operación para regular la temperatura de una masa de agua. Lo anterior hace que el sistema trabaje con menor o mayor potencia según las condiciones climáticas. Zhu, et al. (2013) considera la temperatura externa como un factor relevante en la eficiencia de un sistema de AC. En esta investigación se busca mantener constante una temperatura interna para diferentes condiciones de temperatura externa. Identificando los mínimos niveles de temperatura interna que puede mantener el sistema de AC para altas temperaturas externas. Se busca reducir el consumo energético del sistema para las condiciones anteriormente mencionadas aplicando métodos de control para luego

compararlos entre sí y destacar el que más contribuya al ahorro energético. Lo anterior, buscando la optimización de las prestaciones y consumo de un sistema de AC.

Tomando en consideración la temperatura externa y ejerciendo acciones de control sobre el sistema de AC es posible optimizar el consumo de energía y el confort que éste ofrece al usuario (Yang & Wang, 2015). Lo anterior derivaría en el aporte de un mecanismo automático para el uso eficiente de la energía y cuidado del medio ambiente. El mecanismo anterior evita el sobre esfuerzo del sistema AC, ajustándose según las condiciones actuales de la temperatura externa.

Este trabajo es una oportunidad de investigación de soluciones prácticas, en pro del desarrollo de tecnologías más limpias, que puedan ser aplicadas y repetidas con facilidad por muchas personas. Lo anterior aumentaría el impacto de dichas soluciones, tanto en el aspecto medioambiental como en el social.

4. Delimitación de la investigación

4.1. Delimitación espacial

Esta investigación se desarrolló en la ciudad de Barranquilla, específicamente en dos locaciones de mayor relevancia: 1) las instalaciones de la Universidad de la Costa, donde se realizaron pruebas preliminares de circuitos, diseño de la arquitectura del sistema, reuniones de tutoría, entre otras actividades. Y 2) en las instalaciones de la empresa Gerakion Tech Group, donde se realizó la implementación de las técnicas de control clásico sobre un aire acondicionado tipo mini-split de propiedad de esta empresa.

4.2. Delimitación temporal

El desarrollo de este proyecto tomó un tiempo de 22 meses. Hubo que disponer de este tiempo debido a que se realizaron actividades superpuestas al desarrollo del proyecto.

Marco teórico

5. Antecedentes de la investigación

Los sistemas de Aire acondicionado (AC) son parte del conjunto de Sistemas de Calefacción, Ventilación y Aire acondicionado (HVAC, por sus siglas en inglés). Los sistemas de HVAC son usados para ofrecer confort térmico en edificaciones o en espacios cerrados (Whitman & Jhonson, 2006).

Mediante una revisión, acotada y no sistemática de la literatura, se analizó una pequeña muestra de investigaciones que abordaran la eficiencia de sistemas de HVAC, mediante técnicas de control. Un total de 14 investigaciones hicieron parte del estudio, de las cuales se descartó una, debido a que sus objetivos no se alineaban con los de la presente investigación. Se definieron algunos criterios de calidad de las referencias consultadas, sin ser de carácter estricto o riguroso. Los resultados del análisis de la literatura se presentan en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Tabla 1.

Criterios de calidad

Menciona los Objetivos	Describe claramente el contexto de prueba	Posee una metodología clara	Se comparó con otro modelo o base	El análisis de los datos es riguroso	Los resultados son totalmente claros	Posee valor para la investigación
14	14	14	11	14	14	13

Fuente: elaboración propia.

Las técnicas de control en sistemas de Aire acondicionado (AC) analizadas en la literatura se relacionan con las variables empleadas. Entre las variables que más relevancia tienen se encuentran la temperatura y humedad interna, y temperatura y humedad externa. Las variables internas se asocian a las condiciones dentro del recinto a acondicionar y las variables externas se refieren a las condiciones del medio ambiente exterior al recinto. La Figura 2 presenta un gráfico de barras que relaciona las variables aplicadas en los artículos analizados.

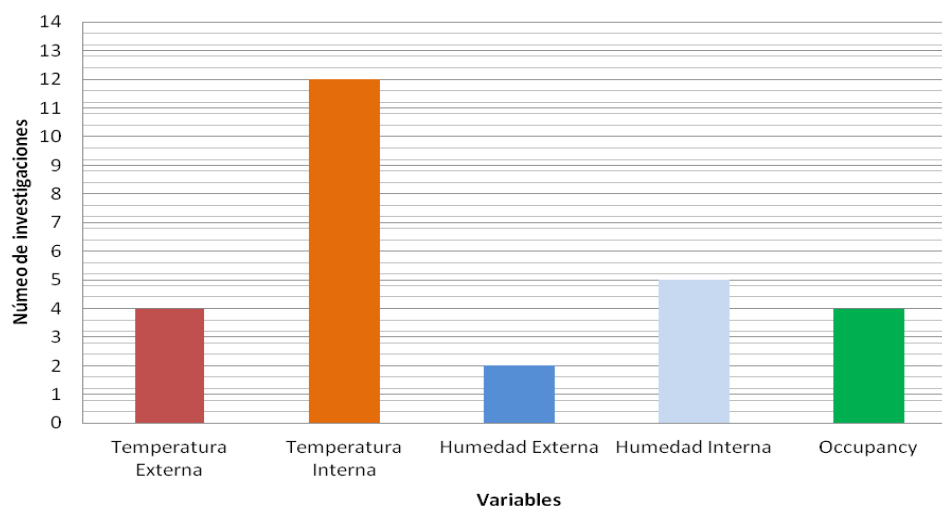


Figura 2. Variables utilizadas en investigaciones para la eficiencia de sistemas AC. Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se presenta una sinopsis de las investigaciones analizadas en la búsqueda de literatura sobre la aplicación de control en sistemas HVAC. Para esto se dividieron las investigaciones en dos grupos bien definidos que son: en el primer grupo están las investigaciones que incluyen técnicas de control con las variables internas del recinto y en el segundo grupo las que además de las variables internas incluyen las externas al recinto.

5.1. Técnicas de control en HVAC con variables internas del recinto.

Li, Ch.; Li, Zh.; Li, M.; Meggers; Schlueter & Lim (2014) diseñaron un sistema HVAC para enfriamiento y acondicionamiento de aire llamado BubbleZERO. Su investigación resultó en el desarrollo de un prototipo que simula un recinto cerrado con un sistema HVAC. Este último está dividido en dos módulos: 1. Enfriamiento y 2. Ventilación. Cada uno de estos módulos está controlado separadamente. El sistema cuenta con una red de sensores inalámbricos que mide en tiempo real la temperatura, la humedad, el nivel de CO₂, la ocupación, y los estados (cerrado-abierto) de las ventanas y las puertas del recinto. El control implementado está basado en la demanda del sistema en ventilación o enfriamiento. Con la descentralización se logra que el sistema sólo use el módulo que necesita, ahorrando así energía. Al comparar los resultados obtenidos de la implementación del prototipo con los sistemas HVAC convencionales, mejoraron el consumo energético en un 45.5%. Su análisis se basó en el Coeficiente estándar de rendimiento (COP: Coefficient of Performance) donde un valor alto del COP indicaba una alta eficiencia energética.

Mondal & Bhattacharya (2015) propusieron un esquema descentralizado para sistemas HVAC en centros comerciales. El desarrollo de su propuesta se enfocó en describir esquemáticamente la descentralización del sistema HVAC a través de gráficos. Es su esquema se pueden diferenciar 6 elementos fundamentales: enfriador (o calentador, según el lugar de instalación), ventilador, ductos de ventilación, compuertas de ventilación, humidificadores y sensores (humedad, temperatura, CO₂, ocupación). Con todos estos elementos es posible sectorizar un edificio y dependiendo de la demanda de frío (o calor) que requiera un sector específico, se abren o se cierran determinadas compuertas de

ventilación con el fin de dirigir el esfuerzo del sistema HVAC en ese sector específico.

Como conclusión a su propuesta indicaron que con esto podría mejorarse el consumo energético de un sistema HVAC, ya que funcionaría bajo demanda. Agregaron además que al introducir un algoritmo de control al sistema se podría mejorar la eficiencia.

Godo, Matsui, & Nishi (2014) implementaron un sistema de control para el sistema AC de una Biblioteca en la ciudad de Kurihara, Japón. Ellos midieron las variables de temperatura y humedad del recinto interno, además de la cantidad de ocupantes de la librería. Para el control de temperatura implementaron un cambio de set-point y un control On-Off, que parametrizaron basados en el indicador PMV (del inglés Predicted Mean Vote) contemplado en la norma de amenidad ambiental ISO7730. Este indicador representa el confort ambiental en un rango numérico entre los valores -3,0 y 3,0. Según la norma anteriormente mencionada, el rango ampliamente aceptado de confort está entre los valores -0,5 y 0,5 del PMV. A partir de la fórmula matemática para calcular el PMV obtuvieron que los valores de temperatura entre 15°C y 20°C se ajustan al confort de los usuarios de la biblioteca de Kurihara. Luego de implementado el sistema de control y medición, hicieron el siguiente experimento: Durante 5 días implementaron el control, de tal manera que los usuarios no configuraban la temperatura en el sistema AC, y durante otros 5 días dejaron el uso normal del AC para que los usuarios configuraran la temperatura a su gusto. Como resultado de lo anterior, obtuvieron una reducción en el consumo de energía del 18,3% y mantuvieron el rango del PMV en el valor de -0,3 en todas las áreas de la biblioteca, cuando el AC trabajó autónomamente.

Zhu, Yang, & Lu (2013) diseñaron un Modelo de Control Predictivo (MPC) para un sistema HVAC centralizado que funciona como helador de agua. Su estudio se basó en la

variación de parámetros lineales (LPV), para identificar el comportamiento del sistema y representar las variaciones dinámicas de la transferencia de calor en diferentes condiciones de trabajo. Para lo cual, identificaron el modelo lineal local en tres condiciones de trabajo representativas, después interpolaron esos resultados y obtuvieron una variación de parámetros lineales globales. Implementaron el MPC, con los parámetros obtenidos del LPV global, para ajustar la frecuencia del compresor y por consiguiente lograr mantener el agua helada a una temperatura constante, incluso en presencia de perturbaciones. Los resultados de su trabajo lograron demostrar que es posible mantener el agua a 7°C variando la cantidad de agua que circula por el sistema.

Mirinejad, Welch, & Spicer (2012) realizaron una revisión de la literatura sobre técnicas de control inteligente implementadas en los sistemas HVAC, ofreciendo información comprensible a cerca de las técnicas de control usadas en estos sistemas. En su revisión de la literatura definieron que las técnicas de control clásico, a pesar de ser eficientes en sistemas lineales, no son suficientes para los HVAC, debido a que son sistemas no lineales de muchas variables de entrada y salida (MIMO, Multiple Output-Multiple Input). Es por eso por lo que centraron su atención en técnicas de control más avanzadas. Encontraron que las técnicas de control más usadas son las de Controladores por Lógica Difusa (FLC, Fuzzy Logic Controllers) combinada con técnicas de cómputo sofisticadas como redes neuronales y algoritmos evolutivos. Lo anterior se debe a que es complejo implementar FLC en los sistemas HVAC, a causa de la gran cantidad de información heurística necesaria para el diseño del controlador. Entre las combinaciones de Modelo Fuzzy y técnicas de cómputo se encuentran: ANNFIS (Método de Sistema Fuzzy de Interfaces Neurológicas Artificiales), GFS (Sistemas Fuzzy Genéticos), NFS (Sistemas

Fuzzy Neuronales. Por otro lado, también se destaca la combinación de técnicas de control clásico con técnicas de cómputo para auto-sintonizar los parámetros de un controlador PID.

Galvéz-Arocha, et al. (2012) realizaron un estudio experimental para analizar el comportamiento del consumo energético de un sistema AC, cuando se le aplica tres tipos de control: On-Off, PID y Lógica Difusa. Su objetivo principal fue determinar cuál de las técnicas de control anteriormente mencionadas es más eficiente en términos de consumo energético. Su trabajo se realizó en un banco de pruebas para estudios de operación de cuartos fríos, el cual tiene una cámara de enfriamiento de $3,45 \text{ m}^3$ recubierta con paredes de poliuretano, y un sistema de refrigeración con un motocompresor hermético de 1,35 KW a 220 V trifásico, con refrigerante R134a y una capacidad nominal de enfriamiento de 4,10 KW y 3,15 KW para 0°C y -5°C Respectivamente. Los resultados que obtuvieron se dividen en dos análisis: **1) la capacidad de cada técnica de control para alcanzar y mantener la temperatura de referencia (set-point).** En este punto lograron identificar condiciones cuasi-estables (mantener el valor de referencia) y transitorias de importancia. Observaron que el control On-Off alcanza la temperatura de referencia en el menor tiempo, debido a que el compresor trabaja a su capacidad nominal; pero en la condición cuasi-estable, el control On-Off no resulta ser muy eficiente debido a que hay ocasiones en que sobre pasa el valor de referencia a causa de la inercia térmica del sistema. Por otro lado, el control PID presenta sólo pequeñas variaciones alrededor de la temperatura de referencia en la condición cuasi-estable, sin embargo, en el control por lógica difusa no se alcanza la temperatura de referencia, lo cual, según el autor no afecta las conclusiones derivadas del análisis energético. **2) El consumo energético del sistema cuando se aplica cada técnica de control en los estados cuasi-estables y transitorios de referencia.** En este análisis se

evidencia que el mayor porcentaje de ahorro se logra implementando el control por lógica difusa independientemente de la cantidad de carga manejada. Con baja carga la técnica de control On-Off ocasiona muchos picos de potencia debido a la cantidad de encendidos y a apagados en cortos períodos de tiempo. Al usar técnicas de control PID y Lógica Difusa recomiendan no trabajar a bajas revoluciones debido a que produce vibraciones en el compresor.

Zhangjun (2011) implementó una optimización de enjambre de partículas (PSO: Particle Swarm Optimization), para auto-sintonizar los parámetros de un controlador PID instalado en un sistema HVAC. La implementación del PSO proporciona los óptimos valores para las variables del controlador PID que son K_p , K_i y K_d . Estos valores se representan como “la mejor solución” que se encuentra con una partícula, que a su vez es comparada con la mejor solución encontrada con la iteración anterior y la mejor solución encontrada por una partícula muy lejana. El criterio para escoger la mejor solución es que la partícula proporcione el mínimo error absoluto de integración. El resultado de esta investigación es el mejoramiento del valor de Overshoot, el tiempo de rizado y el tiempo de ajuste en la respuesta del control PID.

J. Li, Wall, & Platt (2010) desarrollaron un sistema de monitoreo y control predictivo para mantener una adecuada calidad del aire en un edificio de oficinas. Llevaron a cabo la prueba en un solo piso del edificio en el que funciona un HVAC que puede calentar o enfriar dependiendo de la estación del año. El piso contiene 18 oficinas que se comunican a través de un corredor común. Su interés se basó en la concentración de CO_2 , la demanda de ventilación de un área de trabajo específica dependiendo de la cantidad de ocupantes, y el porcentaje de velocidad del ventilador. Para el desarrollo de su control

predictivo, primero realizaron un modelo de ventilación dependiendo de la cantidad de ocupantes en el piso y determinaron un equilibrio de concentración de CO_2 , en el que resultó que para mayor cantidad de ocupantes se debía aumentar el volumen de aire ventilado para disminuir la concentración de CO_2 . Así plantean que si no se implementa un sistema de control predictivo para determinar a futuro el volumen de aire ventilado se estaría consumiendo más energía que si se aumenta gradualmente la ventilación. Por tal razón, hicieron una comparación entre el comportamiento del sistema con la concentración de CO_2 y el porcentaje de velocidad del ventilador cuando no se emplea control predictivo y cuando si se emplea. El resultado de esta comparación es que, sin control predictivo, el porcentaje de velocidad del ventilador es más alta y la frecuencia con que se enciende también; caso contrario pasa cuando se implementa control predictivo: se reduce el porcentaje de velocidad del ventilador y se disminuye la frecuencia con que éste se enciende. Dando como resultado que el volumen de aire ventilado sin control es de 604500 m^3 y cuando se implementa el control de CO_2 se reduce el volumen de ventilación a 230643 m^3 , disminuyendo la necesidad de ventilación en un 62%, lo cual conlleva a un notable ahorro energético.

5.2. Técnicas de control en HVAC con variables externas al recinto.

Soyguder & Alli (2009) diseñaron un sistema HVAC con compuertas de ventilación para el control de temperatura y humedad de un recinto cerrado, teniendo en cuenta la temperatura y humedad externa. Para este trabajo usaron un modelo Fuzzi de optimización enfocado a los parámetros de un control PID. Usaron un sistema de Red Neuro-Fuzzy adaptativa ANFIS (Adaptative Neuro-fuzzy Inference Systems) para predecir la cantidad de

flujo que debe tener el sistema de aire acondicionado para un confort estable. De su investigación concluyeron que, al introducir las variables externas al recinto, como la temperatura, la humedad externa y los requerimientos del usuario, las técnicas de control básicas bajan su rendimiento. Esto debido a la no linealidad de dichas variables del sistema, y es cuando entran en juego los algoritmos de optimización del control para adaptar el control a las perturbaciones inherentes al sistema del sistema.

Preglej et al. (2014) diseñaron un modelo Fuzzi basado en un control predictivo multivariable (FMBMPC: *Fuzzi Model-Based multivariable predictive control*), que busca mejorar la eficiencia energética en un sistema HVAC. En su investigación comparan la eficiencia energética lograda con el FMBMPC y la eficiencia ofrecida por el control PI (Proporcional integral). De lo anterior concluyeron que el algoritmo FMBMPC responde mejor a lo largo de todo el rango de operación, debido a la no linealidad de los sistemas HVAC, presentando tiempos rápidos de rizado y sobreimpulsos muy pequeños. En términos de la mejora de la eficiencia energética concluyeron que muchos factores influyen en el mejoramiento; al comparar los resultados de la eficiencia cuando el sistema trabaja linealmente durante el día no se ve mucha diferencia entre el control PI y FMBMPC, pero al introducir otros factores como horarios de apagado del sistema, ocupación de los recintos o cambios constantes del set-point, el FMBMPC puede llegar a ser un 44% más eficiente que el control PI.

Yang y Wang (2015) desarrollaron una estrategia de optimización de control, en la cual tienen en cuenta la temperatura ambiente (externa) para calcular la temperatura de confort en un recinto cerrado a esa temperatura ambiente. También, realizaron control sobre la concentración de CO₂ mejorando la calidad del aire en el recinto. La estrategia de

optimización que desarrollaron fue un algoritmo optimizador de partícula de abeja (PSO: Particle Swarm Optimizaer). Compararon el rendimiento del PSO con el control clásico On-Off, y concluyeron que si hay una mejoría en la eficiencia energética y de confort del usuario que ofrece el sistema al implementar un algoritmo de optimización.

Zhang, Zeng y Zang (2014) Consideran que las condiciones ambientales de un lugar geográfico afectan el consumo energético de sus habitantes. Con lo anterior indican que el mayor consumo de energía de los habitantes es debido a los sistemas HVAC. En su investigación sobre el desarrollo de un algoritmo de control óptimo multiobjetivo basado en un algoritmo optimizador de partícula de abeja (PSO), incluyeron las variables de temperatura y humedad tanto del ambiente como del recinto cerrado y la medición del confort del usuario para ajustar el sistema a las mismas. Lo anterior da como resultado un MOPSO (Multi-objective Partile Swarm Optimizer) que es simulado para probar su efetividad. Emplean un modelo matemático para describir el nivel de confort del usuario, el comportamiento del sistema HVAC frente a perturbaciones ambientales (estado de la temperatura y humedad externa) y el diseño del algoritmo de optimización del sistema. Con lo anterior consiguen diseñar un sistema inteligente que determina el costo de la energía que consume un usuario particular por el uso del HVAC y garantiza la calidad en el confort del usuario dependiendo de las condiciones ambientales.

Alt y Sawodny (2015) diseñaron y simularon un control con lazo de realimentación controlado (FeedForward controller) para atenuar las perturbaciones desconocidas en un sistema HVAC. Para lo anterior realizaron un modelo matemático para el diseño del control de realimentación que básicamente compensa las perturbaciones conocidas con las desconocidas haciendo que la respuesta del sistema sea más adaptativa al entorno. Las

perturbaciones conocidas que manejaron fue la temperatura y humedad del ambiente y la del recinto.

6. Referentes Teóricos

6.1. Sistemas de Aire acondicionado

Los sistemas de aire acondicionado climatizan el interior de un recinto específico (Quadri, 2001). Los sistemas AC operan bajo las leyes de la termodinámica, que indican que las transferencias de calor (otorgamiento o absorción de calor) se realizan desde zonas de mayor temperatura hacia zonas de menor temperatura. El objetivo del acondicionamiento es controlar la temperatura y la humedad, el filtrado y la ventilación del aire (Whitman, William. Jhonson, 2006). Fundamentalmente existen dos tipos de sistemas de aire acondicionado: los de calefacción y los de refrigeración (Whitman & Jhonson, 2006).

Los sistemas de aire acondicionado para calefacción aumentan la temperatura de un recinto que presenta condiciones de frío inherentes. Por consiguiente, un sistema para calefacción climatiza el ambiente de un recinto con una temperatura cálida, ofreciendo confort térmico a los ocupantes. Es usado en las edificaciones y en las casas de ciudades de clima frío (Quadri, 2001).

Los sistemas de aire acondicionado para refrigeración realizan la operación inversa al anterior, absorben calor de un recinto específico. Al absorber calor de un recinto específico disminuyen la temperatura del ambiente, creando una sensación de frío agradable a los ocupantes (Quadri, 2001).

Los sistemas de aire acondicionado deben cumplir los siguientes requisitos para cumplir su objetivo (Whitman & Jhonson, 2006):

- Proporcionar una adecuada climatización.
- Tener el menor consumo energético posible.
- Ser confiables en términos de operación y funcionamiento.
- Ubicarse estratégicamente para facilitar las tareas de mantenimiento.
- Ser supervisados y operados con equipos de control eficientes.
- Ser amigables con el medio ambiente no generando contaminación auditiva o química.

6.2. El Ciclo de Refrigeración

El Ciclo de Refrigeración comprende cuatro procesos mecánicos que son evaporación, compresión, condensación y expansión de un elemento químico llamado refrigerante. En la Figura 3, se muestra el Ciclo de Refrigeración. Así mismo, para cumplir el Ciclo de Refrigeración son necesarios cuatro elementos básicos: Evaporador, compresor, condensador y válvula de expansión. (Whitman & Jhonson, 2006, p. 30)

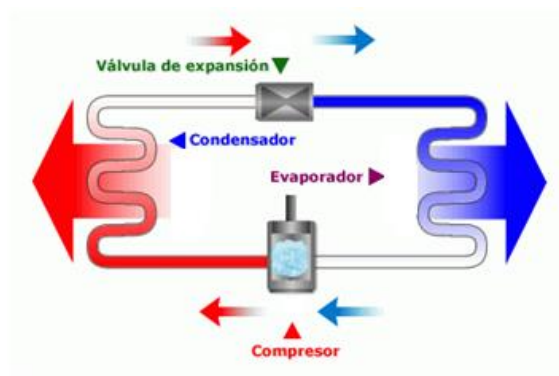


Figura 3. Ciclo de refrigeración. Fuente: ("El Ciclo de Refrigeración - Cómo Funciona," n.d.)

El Ciclo de Refrigeración es el siguiente:

1. El refrigerante pasa a través del evaporador en estado cuasi líquido (75% líquido y 25% gaseoso), y a una temperatura aproximada de 4°C. A lo largo de la trayectoria en el evaporador, el refrigerante va ganando calor por el contacto con el aire del recinto a climatizar, y por consiguiente cambiando de estado cuasi líquido a estado completamente gaseoso al final del evaporador. (Whitman & Jhonson, 2006, p. 31)

2. Luego de lo anterior, el refrigerante en estado gaseoso es succionado y comprimido por el compresor, para luego ser enviado al condensador a una temperatura aproximada de 95°C. (Whitman & Jhonson, 2006, p. 32)

3. El refrigerante que circula a través del condensador empieza a ceder calor al ambiente externo y a condensarse. Para el final del recorrido, el refrigerante alcanzará una temperatura aproximada de 52°C, a la cual el refrigerante será 100% líquido. (Whitman & Jhonson, 2006, p. 34)

4. Luego de que el refrigerante pasa por el condensador se dirige hacia la válvula de expansión, la cual funciona como un Tubo Venturi, que crea un lado de baja presión hacia el evaporador. Este proceso hace que el refrigerante se expanda liberando presión y por consiguiente bajando la temperatura a 4°C aproximadamente, para que circule nuevamente por el evaporador y se reinicie el Ciclo de Refrigeración. (Whitman & Jhonson, 2006, p. 36)

6.3. Clasificación de los sistemas de aire acondicionado

Existen fundamentalmente dos tipos de sistemas de aire acondicionado (AC), los de calefacción y los de refrigeración. En el presente documento sólo se tomaron los referentes

teóricos correspondientes a los sistemas AC de Refrigeración. Técnicamente los sistemas AC para la refrigeración se clasifican como sigue.

6.3.1. Según su propósito

6.3.1.1. Confort

Los sistemas de AC para confort pretenden establecer condiciones atmosféricas favorables en un recinto cerrado, para proporcionar bienestar a los sujetos que usan dicho recinto. Ejemplo de sistemas de AC para confort son los usados en hogares, oficinas, restaurantes, instituciones de educación, entre otros. (Quadri, 2001, p. 24)

6.3.1.2. Procesos industriales

Los sistemas AC para procesos industriales es controlar las condiciones atmosféricas de un recinto cerrado, para satisfacer las necesidades de procesos industriales que así lo requieran. Ejemplo de estos son cuartos frigoríficos para conservación de alimentos, laboratorios químicos o biológicos, entre otros. (Quadri, 2001, p. 24)

6.3.2. Según su forma de instalación

6.3.2.1. Central

Los sistemas AC centrales son los que, por su diseño e instalación, un único equipo distribuye el aire climatizado a todas las áreas y sectores de un edificio desde una ubicación central. (Quadri, 2001, p. 25)

6.3.2.2. Semicentral

Los sistemas AC semicentrales son los que, por su diseño e instalación, varios equipos se instalan en diferentes áreas de un edificio, y su función la cumplen dentro de cada área específica. Por ejemplo, a un edificio comercial X, se le instala un equipo AC en cada piso, para distribuir el aire climatizado sólo en los espacios, oficinas o locales donde fue instalado. (Quadri, 2001, p. 26)

6.3.2.3. Individual

Los sistemas AC individuales son los que, por su diseño e instalación, un único equipo climatiza el aire de un espacio específico, como por ejemplo un AC dedicado a climatizar una oficina. (Quadri, 2001, p. 26)

6.3.3. Según la potencia

6.3.3.1. Sistemas con equipos de gran potencia

Estos son los sistemas que consumen una potencia mayor a 6KW. Dentro de esta clasificación están los sistemas AC central, semicentral. (Miranda, 2005, p. 239)

6.3.3.2. Sistemas con equipos de baja potencia

Estos son los sistemas que consumen una potencia entre 1 y 6 KW. Dentro de esta clasificación están los sistemas AC individuales, usados para climatización doméstica y de pequeños locales comerciales. (Miranda, 2005, p. 187)

6.3.4. Según el tipo de sistemas

Para esta clasificación se tienen en cuenta los elementos que cada equipo emplea para llevar a cabo del Ciclo de Refrigeración. Según esta clasificación, los sistemas AC se pueden

dividir en dos grandes grupos: de Expansión Directa y de Expansión Indirecta. (Quadri, 2001, p. 26)

6.3.4.1. Expansión Directa (Todo Refrigerante)

Se denominan sistemas de Expansión Directa o Todo Refrigerante debido a que en estos sistemas el refrigerante que se expande entra en contacto, a través del evaporador, con el aire a climatizar. (Quadri, 2001, p. 26)

6.3.4.1.1. Sistemas Autocontenidos

Los sistemas Autocontenidos son aquellos que se componen de un único gabinete, en el que se encuentran el evaporador, compresor, condensador y la válvula de expansión. Existen dos tipos de sistemas Auto contenidos:

Para interiores: son aquellos que se instalan directamente en el recinto a climatizar, ejemplo de estos sistemas son los conocidos aires de ventana, que se muestra en la Figura 4 y la Figura 5. (Quadri, 2001, p. 112)

Para exteriores: son aquellos que se instalan fuera del recinto y lo climatiza a través de un conducto sin derivaciones (Quadri, 2001, p. 112). Ver Figura 6.

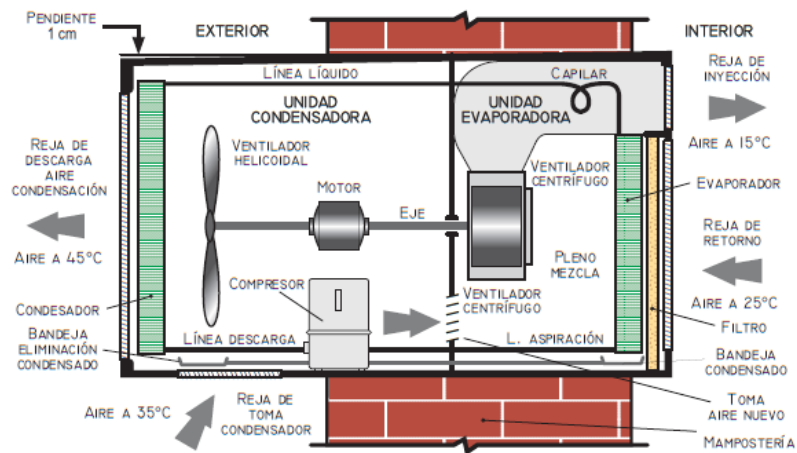


Figura 4. Sistema AC Autocontenido para interiores (de ventana). Fuente: Quadri, 2001, p. 113.

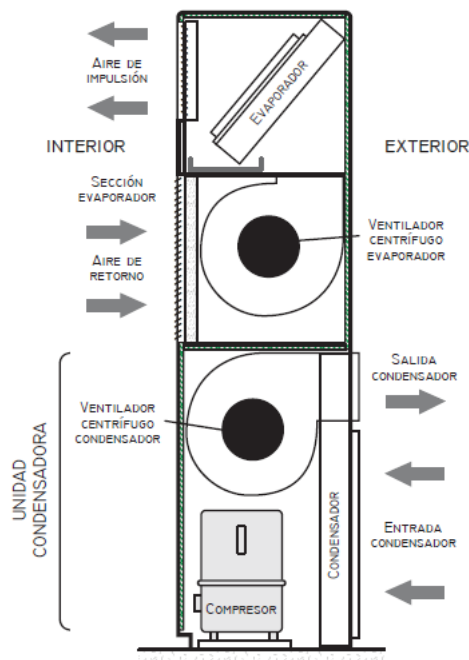


Figura 5. Sistema AC Autocontenido para interiores (tipo torre). Fuente: adaptado de Quadri, 2001, p. 121.

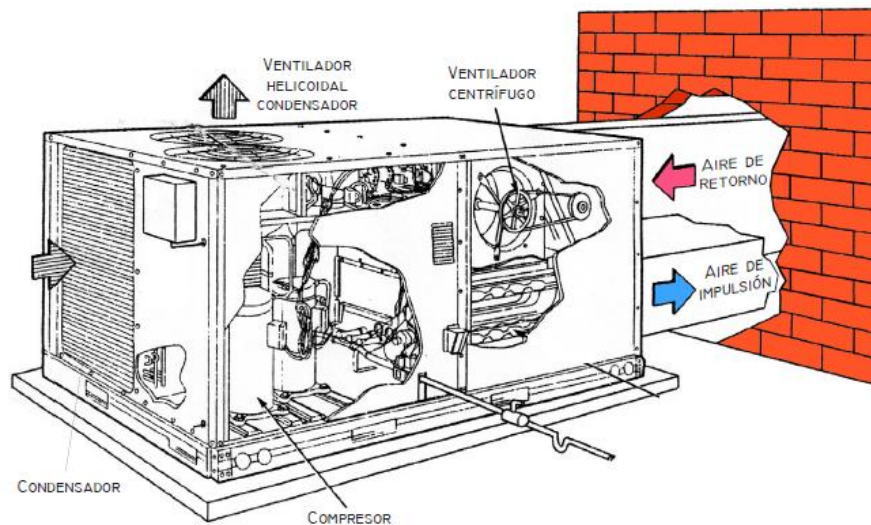


Figura 6. Sistema AC Autocontenido para exteriores (montaje techo). Fuente: adaptado de Quadri, 2001, p. 119.

6.3.4.1.2. Sistemas Fragmentados (Split)

Los sistemas Split (Fragmentados) son aquellos que en diferentes gabinetes contienen los elementos necesarios para llevar a cabo el Ciclo de Refrigeración. Comúnmente estos sistemas tienen dos unidades, una es la unidad interior compuesta por el evaporador y el abanico de circulación de aire, y la otra unidad exterior compuesta por el evaporador, el compresor y la válvula de expansión. Los sistemas Split se clasifican a su vez en tres tipos:

Mini-Split (o Simple-Split): son aquellos sistemas que cuentan con una única unidad exterior y una única unidad interior. En la Figura 7 se puede apreciar un ejemplo de este tipo de sistemas. (Quadri, 2001, p. 132)

Multi-Split: son aquellos que cuentan con una única unidad exterior y varias unidades interiores que pueden instalarse en diferentes recintos. En los sistemas Multi-Split

todas las unidades interiores tienen la misma capacidad de enfriamiento, puesto que a ellas llega la misma cantidad de refrigerante. (Quadri, 2001, p. 135)

Flujo Variable de Refrigerante: o VRF (del inglés Variable Refrigerant Flow), son aquellos que cuentan con una única unidad exterior y varias unidades interiores, que se instalan en diferentes recintos. Con los sistemas VRF es posible controlar la capacidad de enfriamiento de cada una de las unidades interiores, a través de la regulación de la cantidad de refrigerante que llega a éstas desde la unidad exterior. Por consiguiente, con el mismo sistema se pueden configurar diferentes temperaturas en diferentes recintos. (Quadri, 2001, p. 136)

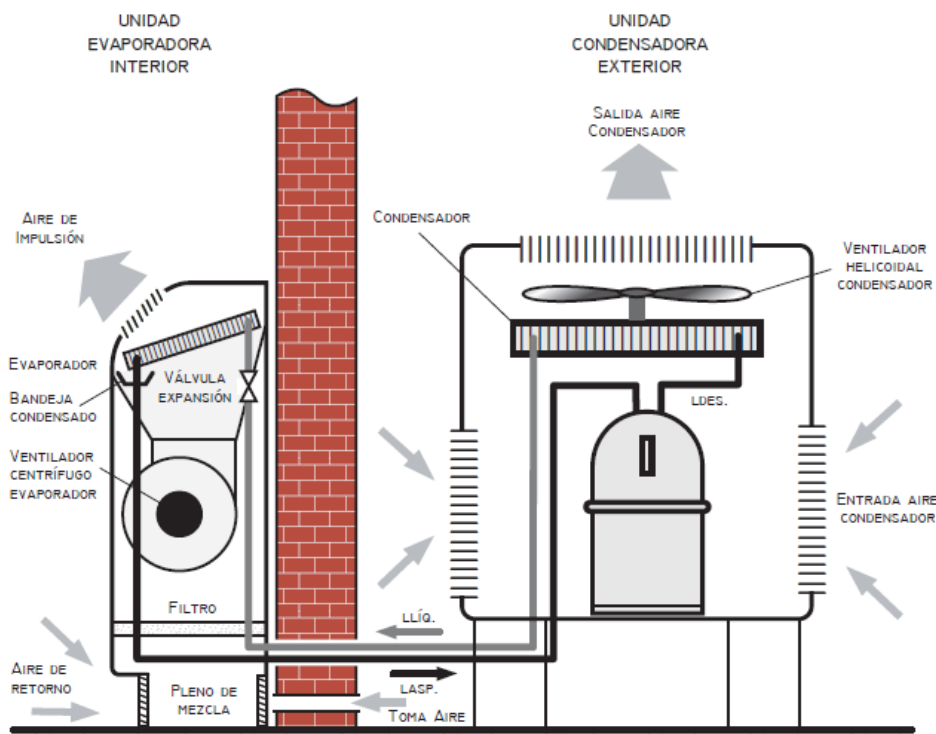


Figura 7. Sistema AC Simple Split o Mini-Split. Fuente: adaptado de Quadri, 2001, p. 131.

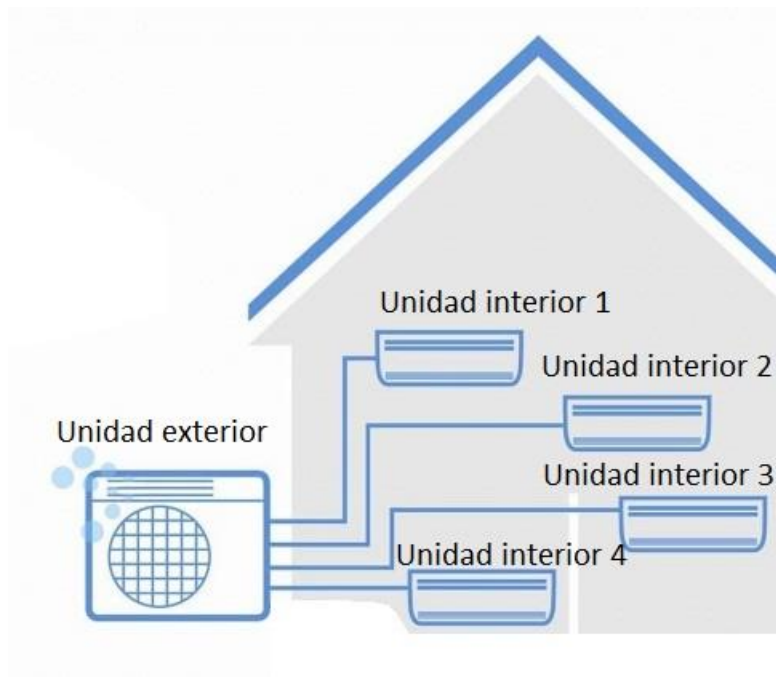


Figura 8. Sistema AC Multi-Split. Fuente: adaptado de <https://img.interempresas.net/fotos/1350034.jpeg>

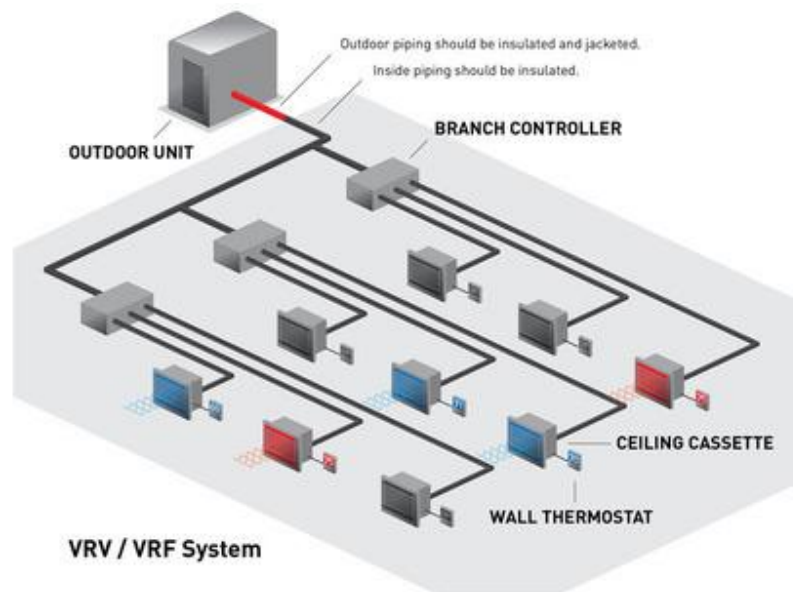


Figura 9. Sistema AC de Flujo Variable de Refrigerante VRF. Fuente: adaptado de <https://4.imimg.com/data4/BE/BO/MY-897716/toshiba-vrf-vrv-systems-500x500.jpg>

6.3.4.2. Expansión Indirecta

Se conocen como sistemas de Expansión Indirecta aquellos sistemas que usan un segundo fluido termodinámico para climatizar el aire. Este segundo fluido termodinámico puede ser aire o agua. (Quadri, 2001, p. 156). Los sistemas de Expansión Indirecta se clasifican como sigue:

6.3.4.2.1. Sistemas Todo Aire

Los sistemas Todo Aire son equipos Auto contenidos, pero que se instalan lejos del recinto a climatizar y sus conductos de climatización tienen diferentes derivaciones hacia otros recintos. Estos equipos usan como fluido termodinámico secundario el aire que circula por los conductos. (Quadri, 2001, p. 156)

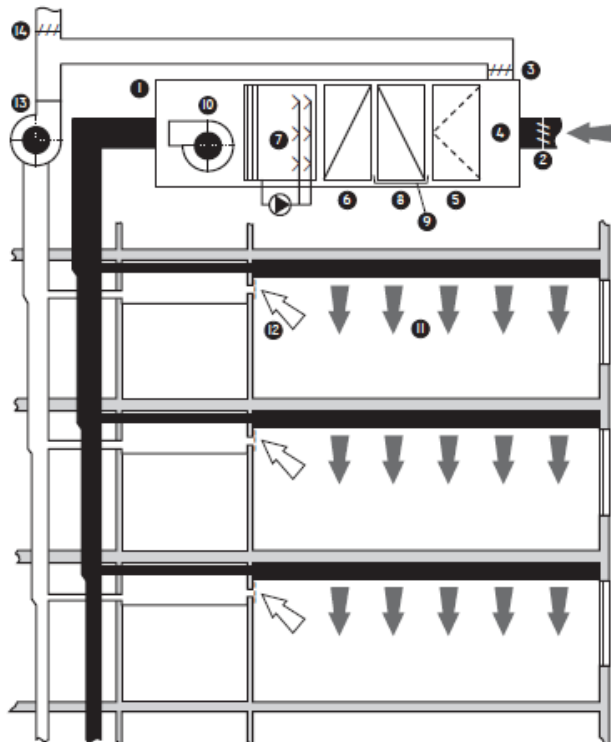


Figura 10. Esquema de un sistema AC Todo Aire. Fuente: adaptado de Quadri, 2001, p. 156

6.3.4.2.2. Sistemas Todo Agua

Los sistemas Todo Agua son aquellos en los que en el recinto a climatizar se instalan unidades terminales compuestas por un serpentín y un abanico (unidades Fan-Coil, del inglés). A través del serpentín circula agua fría que proviene de una unidad enfriadora de agua, que se encuentra alejada del recinto a climatizar. El agua fría es impulsada por un compresor y se transporta a través de tuberías especiales hasta cada una de las unidades terminales. El abanico de la unidad terminal se encarga de circular el aire del recinto a climatizar poniéndolo en contacto con el serpentín. En estos sistemas el fluido termodinámico empleado para climatizar es el agua. (Quadri, 2001, p. 145)

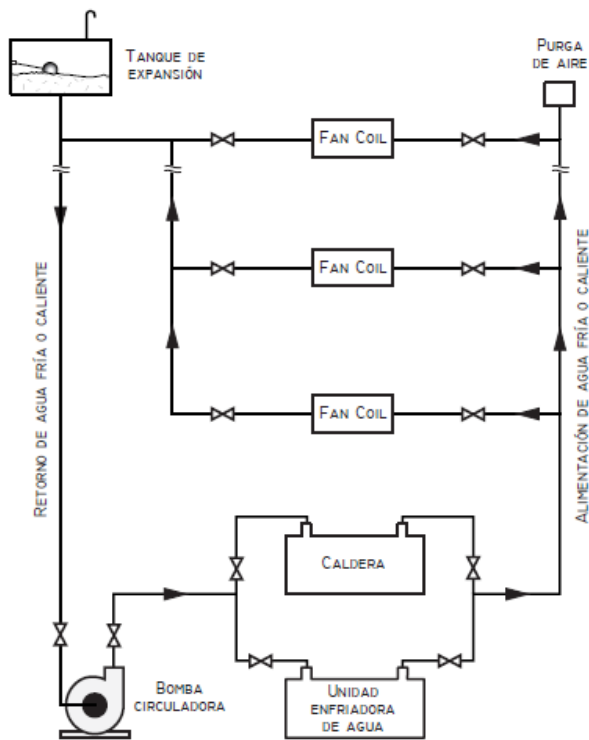


Figura 11. Esquema de un sistema AC Todo Agua. Fuente: adaptado de Quadri, 2001, p. 145.

6.4. Sistemas de control

Se define control como la acción de regular una variable física en función de parámetros deseados. Un sistema de control es un conjunto de dispositivos, que mediante una parametrización es capaz de regular una variable física. Por ejemplo, mantener constante la temperatura en un recinto encendiendo o apagando una resistencia de calor. Un ejemplo más complejo podría ser regular la intensidad de iluminación en un recinto según el cambio de la luz natural (Kuo, 1996).

El objetivo de un sistema de control es mantener una variable física específica en un estado predeterminado, la cual varía por efecto de perturbaciones. Existen dos tipos de control: de lazo abierto y de lazo cerrado (Ogata, 2010b) (Kuo, 1996) (Dominguez, Campoy, & Sebastián, 2000).

El control de lazo abierto es el tipo de control más simple, puesto que la variable a controlar sólo depende de parámetros preestablecidos, que no cambian dependiendo de las condiciones del proceso a controlar (Dominguez et al., 2000). Un ejemplo de control de lazo abierto es el temporizador de un horno: el usuario ajusta el tiempo que durará el horno funcionando, pero en este tiempo no se sabe si la comida quedará bien cocida o no, si se quemará o no; pero el temporizador desactivará el horno en el tiempo indicado, por eso el control de lazo abierto también es conocido como control sin realimentación.

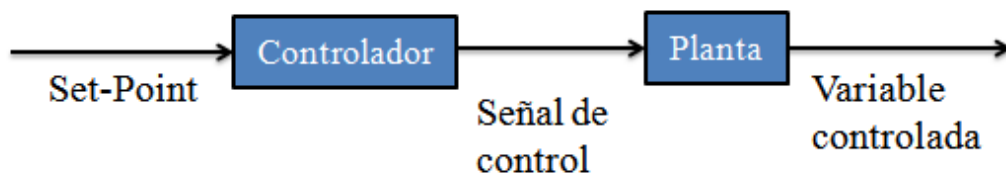


Figura 12. Representación de un sistema de control de lazo abierto. Fuente: elaboración propia.

En el control de lazo cerrado el sistema, la variable a controlar no sólo depende del parámetro preestablecido, sino que también se tienen en cuenta otras variables que afectan al proceso y los parámetros del sistema pueden modificarse dependiendo de las condiciones actuales de la salida del sistema. Es decir, en el control de lazo cerrado se calcula una diferencia entre la señal de entrada y la señal de salida, esta función es realizada por el bloque comparador que se observa en la Figura 3. Un ejemplo de control de lazo cerrado es el control de posición del eje de un motor, en este caso el controlador hace girar el motor en uno u otro sentido y la información sobre la posición del eje es enviada al controlador por medio de una señal de encoder; de esta manera el controlador sabrá cuanto girar el motor cada vez que se le envíe una señal de posición diferente.

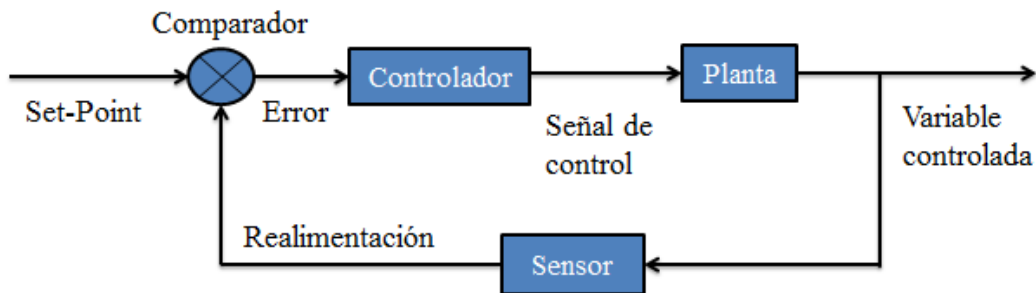


Figura 13. Representación de un sistema de control de lazo cerrado. Fuente: Elaboración propia.

En los sistemas de control pueden ser implementadas diferentes técnicas de control como, por ejemplo: control proporcional y control PID. Estas técnicas son las llamadas clásicas, puesto que son las primeras técnicas en implementarse. Existen otras técnicas de control más avanzado: control por lógica difusa, control predictivo, control adaptativo o

control robusto, entre otros. Para la presente investigación es de principal importancia sólo las técnicas de control clásico que se describen a continuación.

6.4.1. Técnicas de control

6.4.1.1. Control Proporcional

El control proporcional es un amplificador simple con una ganancia ajustable K . La señal de entrada y salida del controlador están relacionadas entre sí proporcionalmente al valor de la constante K . (Mazzone, 2012)

La señal de entrada del controlador es la *señal de error* que se obtiene en el comparador de la Figura 3, y la salida es la *señal de control*. (Alfaro Ruíz, 2011) La relación matemática entre la entrada y la salida de del controlador se expresa como sigue:

$$u(t) = K_p e(t)$$

Donde:

$u(t)$: es la señal de salida del controlador proporcional,

$e(t)$: es la señal de error que entra al controlador proporcional.

K_p : es la constante proporcional.

Aplicando transformada de Laplace se obtiene:

$$U(S) = K_p E(S)$$

$$\frac{U(S)}{E(S)} = K_p$$

6.4.1.2. Control PID

El controlador PID es una combinación de técnicas de control Proporcional, Integral y Derivativo (Alfaro Ruíz, 2011). Un control derivativo proporciona respuesta rápida a los cambios en la señal de error. Con un control integral, un error positivo a la entrada del controlador dará una señal de salida creciente y un error negativo una señal de salida decreciente, y cuando el error es cero, la señal de salida es constante (Ogata, 2010a).

La relación entre la entrada (*señal de error*) y la salida (*señal de control*) del controlador en el espacio de la frecuencia es:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

Donde:

K_i : es la constante integral, que corresponde a la acción integral del controlador.

K_d : es la constante derivativa, que corresponde a la acción derivativa del controlador.

En la acción integral se multiplica K_i por la integral del error a la entrada del controlador. En la acción derivativa se multiplica K_d por la derivada del error a la entrada del controlador (Mazzone, 2012).

6.5. Plataformas de desarrollo

Existen plataformas que permiten implementar todo tipo de aplicaciones de electrónica y software, para facilitar el estudio, diseño y construcción de prototipos, desde proyectos muy simples hasta otros mucho más complejos. Una de las plataformas de desarrollo más conocidas es Arduino.

6.5.1. Arduino

Como definen sus creadores en la página oficial de Arduino: “Arduino es una plataforma de prototipos electrónica de código abierto (open-source) basada en hardware y software flexibles y fáciles de usar” (Arduino Playground, n.d.-a). El hardware de Arduino consiste en tarjetas de desarrollo basadas en diversos tipos de microcontroladores, las cuales tienen periféricos de programación, comunicación, y control. Existen diversidad de tarjetas Arduino y se programan usando el Lenguaje de Programación Arduino (Arduino Programming Language, del inglés), y el Entorno Integrado de Desarrollo Arduino (Arduino IDE, Arduino Integrated Development Environment, del inglés).

6.5.1.1. Entorno Integrado de Programación Arduino

El Entorno de Programación Arduino (IDE Arduino) es un conjunto de herramientas de software que permite a los usuarios de Arduino desarrollar aplicaciones con facilidad (Torrente, 2013, p. 129). Este IDE Arduino permite escribir, guardar, compilar y cargar a la tarjeta Arduino, las instrucciones dadas por el usuario a través del Lenguaje de Programación. (Torrente, 2013, p. 129)

Al iniciar el IDE Arduino se despliega una vista como la que se muestra en la Figura 14. A esta vista también se le conoce con el nombre de Sketch (del inglés boceto), y es donde el usuario crea y declara las funciones e instrucciones que debe ejecutar la placa Arduino. Este Sketch permite guardar separadamente la interacción del usuario y la placa Arduino, a manera de un archivo de proyecto, que puede ser copiado o movido a diferentes carpetas o sincronizado en la nube. (Arduino Reference, n.d.)

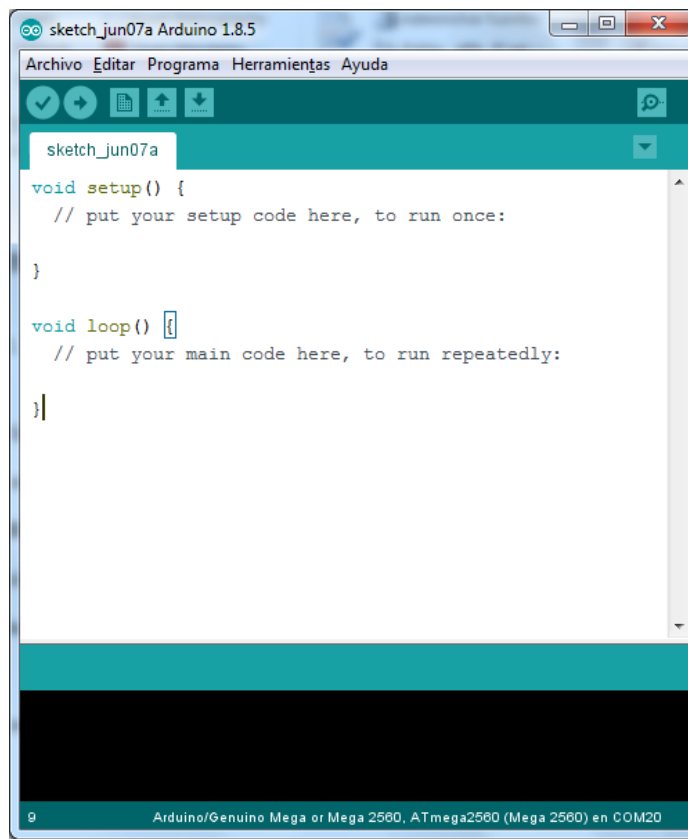


Figura 14. Vista inicial del entorno de programación Arduino. Fuente: adaptado de <http://arduino.cl/que-es-arduino/>

6.5.1.2. Lenguaje de Programación Arduino

El lenguaje de Programación es el que permite al usuario dar las instrucciones que desea a la placa Arduino. La estructura del Lenguaje de Programación Arduino se compone de dos partes, que también se conocen como funciones principales, enmarcan las instrucciones que el usuario desarrolla. Estas dos funciones son: `setup ()` y `loop ()`. (Arduino Playground, n.d.-b).

La función `setup ()` debe contener las funciones de configuración inicial de la placa Arduino, dependiendo del desarrollo del usuario. Las instrucciones que se declaran en la función `setup ()` sólo se ejecutarán una vez cada vez que se enciende o reinicia la placa

Arduino. (Torrente, 2013, p. 154) Un ejemplo de las instrucciones que se pueden encontrar en la función `setup ()` son: declaración de pines digitales como entrada o salida, inicialización del monitor serial, inicialización de cierto tipo de dispositivos como pantallas LCD, adaptadores de memorias SD, WiFi o Ethernet, entre otros. (Arduino Playground, n.d.-b)

La función `loop ()` debe contener las instrucciones que se ejecutarán cíclicamente siempre y cuando no se reinicie o apague la placa Arduino. La función `loop ()` se ejecuta justo después que se ejecuta la función `setup ()`. (Torrente, 2013, p. 154). En esta función se pueden programar por ejemplo lectura de entradas analógicas o digitales, cambiar el estado de pines de salida, escribir señales por los pines PWM, entre otras. Con lo anterior es posible obtener lectura de sensores, accionar relés o transistores que a su vez accionan una carga mayor, y otras aplicaciones mucho más complejas como por ejemplo realizar comunicación Bluetooth, WiFi o Ethernet.

Las funciones `setup ()` y `loop ()` se pueden apreciar al iniciar el entorno de programación Arduino como se muestra en la Figura 14.

Existe secciones que no está delimitada por algún símbolo dentro del Sketch de Arduino, pero que son de vital importancia y se usan de manera generalizada, así como las funciones principales. Esta sección es el espacio antes de la función `setup ()`, el cual está reservado para la declaración de variables globales, es decir variables que se pueden usar tanto en las funciones principales (`setup ()` y `loop ()`), como en funciones secundarias que el usuario haya creado por necesidad. Esta sección antes del `setup ()` también se usa para otras configuraciones generales como la declaración librerías y la declaración de objetos.

Las funciones secundarias son funciones que el usuario crea a partir de una necesidad estratégica en la programación. Dichas funciones pueden ser “llamadas” condicionalmente a ejecutarse en el loop (). Un ejemplo de un llamado condicional a una función puede ser el agotamiento de un tiempo de espera para dicha función secundaria, o el acontecimiento de algo importante como puede ser la variación específica en el estado de una variable.

6.5.1.3. Arduino Mega2560

Esta placa está basada en el microcontrolador ATmega2560, y tiene los siguientes periféricos: 16 pines analógicos de entrada, 54 pines digitales de entrada/salida, de los cuales 14 pueden usarse como PWM, y 4 puertos seriales de Hardware, entre otros.

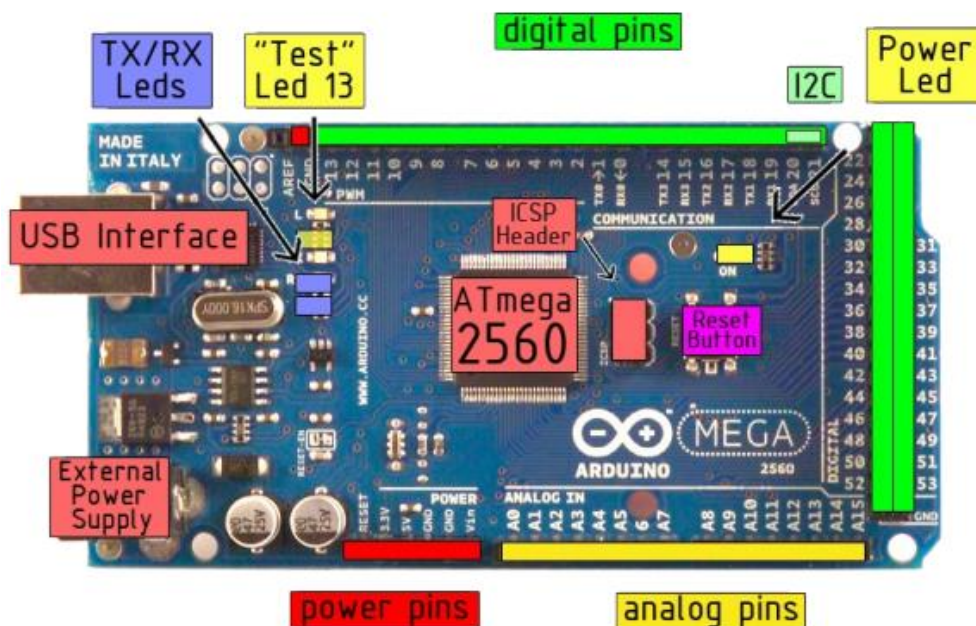


Figura 15. Placa Arduino Mega 2560. Fuente: adaptada de Tomado de

<http://www.mantech.co.za/datasheets/products/A000047.pdf>

6.5.1.4. Sensores compatibles con la plataforma Arduino

Un sensor es cualquier dispositivo que permite tomar controladamente la medición de una variable física, y traducirla en un pulso eléctrico para que pueda ser interpretada por un controlador. (Tiscornia & Defelippe, n.d., p. 100). La plataforma Arduino soporta una gran variedad de sensores que se acoplan con las placas Arduino: sensores de temperatura, de humedad, de posición, de distancia, de tensión, de corriente, entre otros. A continuación, se describen algunos sensores específicos.

6.5.1.4.1. Sensor de Temperatura y Humedad DHT11

Para medir las variables de temperatura y humedad se usó un sensor DHT11, el cual tiene las características técnicas mostradas en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** La salida de este sensor es digital, por ende, debe conectarse al puerto de entrada/salida digital del Arduino. Se escogió este sensor debido a la facilidad de integración con la plataforma Arduino su nivel de exactitud.

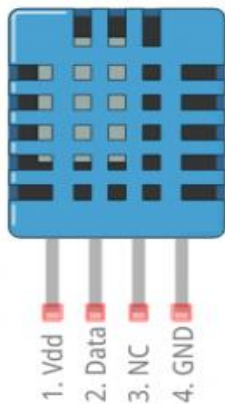


Figura 16. Sensor DHT11. Fuente: adaptada de <https://www.maxphi.com/wp-content/uploads/2017/08/dht11-pinout-173x300.png>

Tabla 2.

Características técnicas del sensor DHT11.

Modelo	DHT11
Tensión de alimentación	3 – 5.5 VDC
Señal de salida	Señal digital vía bus simple
Elemento sensor	Resistor polimérico
Rango de mediciones	Humedad: 20 – 90 %RH; Temperatura: 0 – 50 °C
Exactitud	Humedad: $\pm 4\%$ RH; Temperatura: $\pm 2.0^\circ\text{C}$
Sensibilidad	Humedad: $\pm 1\%$ RH; Temperatura: $\pm 0.1^\circ\text{C}$
Repetitividad	Humedad: $\pm 1\%$ RH; Temperatura: $\pm 1^\circ\text{C}$
Histéresis en la medición de la humedad	$\pm 1\%$ RH
Estabilidad a largo plazo	$\pm 5\%$ RH/año
Período de medición	En promedio 2s

Fuente: adaptada de <https://akizukidenshi.com/download/ds/aosong/DHT11.pdf>

En la Figura 16 se muestra el sensor y la descripción de sus periféricos.

6.5.1.4.2. Sensor de corriente no invasivo ECS1030L72

El sensor de corriente ECS1030L72 es de tipo no invasivo, ya que funciona con el principio de electromagnetismo. Básicamente este sensor es un transformador de corriente, que tiene una relación de transformación de 1/2000. Este sensor facilita la medición de la corriente consumida por cualquier carga, ya que no es necesario cortar las líneas de alimentación para conectarlo. La salida de este sensor es analógica, por consiguiente, debe ser acondicionada antes de ingresarla a algún controlador o dispositivo programable, que vaya a integrar este tipo de sensor.



Figura 17. Sensor de corriente ECS1030L72. Fuente: adaptada de <https://www.electronicaembajadores.com/es/Productos/Detalle/SSMGC30/sensores/sensores-de-campo-magnetico/sensor-de-corriente-30-amperios>

6.5.1.4.3. Sensor de tensión AC Zmpt101b

El trabajo del sensor de tensión es reducir el nivel de tensión y adaptarlo al nivel de tensión que puede ser manejado por la placa Arduino. Para realizar lo anterior es necesario de un transformador reductor de tensión y de un circuito de acoplamiento de señal. En la figura se muestra el sensor de tensión AC Zmpt101b monofásico que integra estos dos componentes en un pequeño módulo. Este sensor mide tensiones desde 0 a 250V, tiene una relación de transformación de 1/1, y una corriente nominal de 2mA



Figura 18. Sensor de voltaje AC Zmpt101b. Fuente: adaptada de: adaptada de <http://qqtrading.com.my/ac-voltage-sensor-module-zmpt101b-single-phase>

6.5.1.5. Almacenar datos con Arduino

Debido a que no es posible guardar prolongadamente los valores de una variable específica usando la memoria interna de la placa Arduino, surge la necesidad de implementar sistemas de almacenamiento de datos compatibles con Arduino. A continuación, se presenta una solución de almacenamiento compatible con Arduino y de uso muy extendido.

6.5.1.5.1. Data Logger Shield

Este es un dispositivo diseñado y comercializado por Adafruit Industries. Su función es registrar los datos que procesa la placa Arduino. El dispositivo se puede observar en la Figura 19. Este dispositivo es llamado shield (del inglés, coraza) debido a que se incrusta sobre las placas Arduino como una coraza.

Este dispositivo se compone de dos módulos principales: el módulo para tarjetas Secure Digital (módulo SD), y el módulo para el reloj en tiempo real (módulo RTC, del inglés Real Time Clock) (Ver Figura 20).

Debido a que este dispositivo posee un reloj en tiempo real es posible guardar datos que estén relacionados con la fecha y hora en la que se adquirieron. Por ejemplo, en un determinado instante de tiempo el Arduino puede guardar en un slot de la SD el valor actual de una variable cualquiera junto con la fecha y la hora del instante de tiempo.

Este dispositivo se configura a través de la placa Arduino, es decir no tiene comunicación directa con el programador de Arduino. Por lo anterior, Arduino tiene una librería especial para controlar este dispositivo de manera sencilla, la cual se llama SDLib (Adafruit, n.d.-a). Esta librería permite configurar los parámetros de los dos módulos del

dispositivo. Por ejemplo: se puede configurar el RTC para que la fecha y hora se ajusten manualmente o en sincronía con el computador con el cual se está programando el Arduino. También es posible configurar el tipo de archivos que se guardará en la memoria SD.



Figura 19. Datalogger Shield. Tomado de: <https://learn.adafruit.com/adafruit-data-logger-shield/overview>

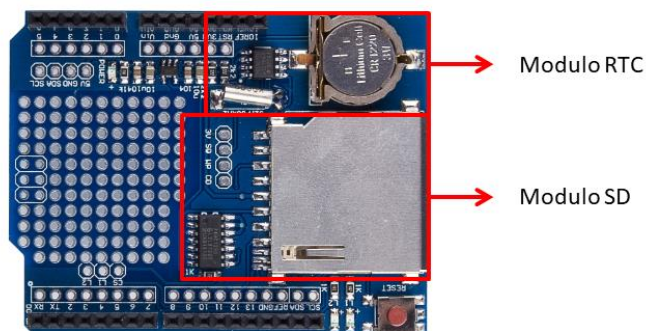


Figura 20. Módulos principales del Datalogger Shield Adaptado de: <https://learn.adafruit.com/adafruit-data-logger-shield/overview>

6.5.1.5.2. El módulo SD

Este módulo se encarga de integrar en Arduino todas las conexiones físicas necesarias para que se registren los datos tratados por la placa Arduino en una memoria tipo SD. Normalmente ocupa los pines digitales del 1 al 10 de la placa Arduino Mega 2560. (Adafruit, n.d.-a). Los datos que se almacenan pueden tener cualquier tipo de extensión de

Archivo, puesto que lo que el Arduino trata son bits de datos, es decir puede guardar tanto archivos de texto plano como archivos de imágenes.

6.5.1.5.3. El módulo RTC

Este módulo es técnicamente un reloj digital, y su objetivo de mantener la fecha y la hora actual, aun cuando no se esté alimentando el dispositivo, para lo cual emplea una batería tipo botón de óxido de plata. Este dispositivo proporciona la seguridad de que ante fallas de energía no se desconfigurará la hora, y los datos que se obtenga luego de que el sistema se recupere de la falla se seguirán relacionando con la hora y fecha correctas. (Adafruit, n.d.-a).

6.6. Técnicas para el análisis de datos

6.6.1. Modelo de Regresión Lineal Simple

Un modelo de Regresión Lineal Simple (Modelo RLS) busca correlacionar el comportamiento de al menos dos variables, considerando que existe una variable dependiente para cual el modelo realiza un pronóstico o explicación, y otra variable independiente explica el comportamiento de la primera (Walporle, Myres, Myres, & Ye, 2012).

El modelo RLS tiene la siguiente proporciona la siguiente ecuación:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x$$

Donde: Y es la variable dependiente sobre la cual se desea hacer un pronóstico, x es la variable independiente y que afecta en alguna medida a la variable dependiente. Por otro

lado β_0 es la intersección del comportamiento de las dos variables, β_1 es la pendiente de ese comportamiento. (Walporle et al., 2012)

Puede que existan más de una variable independiente que permitan explicar la variable dependiente, para este caso el modelo RLS proporciona la siguiente ecuación (Walporle et al., 2012):

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_n x_n$$

Esta técnica de análisis de datos se implementa actualmente a través de softwares especializados, los cuales se conocen como Paquetes Estadísticos. Los Paquetes Estadísticos que se encuentran en el mercado son: SPSS, STATISTICA, STATA, SYSTAT, entre otros.

Marco metodológico

7. Tipo, enfoque y alcance de la investigación

Este trabajo se esfuerza en una investigación de desarrollo tecnológico que aplica los conocimientos de áreas como la Electrónica, la Teoría de Control y las Comunicaciones Inalámbricas para desarrollar un prototipo no comercializable que permita la evaluación del mejoramiento del consumo energético y la capacidad de enfriamiento de un sistema AC utilizando el prototipo. Como factor de diferenciación, el prototipo considera la temperatura externa en el lazo de control.

Por su parte, la labor investigativa se enfoca en el ámbito cuantitativo siguiendo una secuencia de pruebas en la implementación de métodos de control clásico que permita correlacionar la incidencia de la temperatura externa en la operación de un sistema de climatización sobre la técnica control, la temperatura interna y el consumo de energía.

El alcance es descriptivo y de correlación del efecto de la temperatura externa en el funcionamiento de un sistema AC al que se le incorporan técnicas de control que relacionan dicha variable.

Tabla 3.

Datos metodológicos.

Investigación		
Tipo	Enfoque	Alcance
Desarrollo tecnológico	Cuantitativo	Descripción y Correlación

Fuente: Elaboración propia.

8. Diseño de la investigación

Para el logro del objetivo general se propone una solución en tres fases: 1. Análisis del estado de la literatura sobre la incidencia de la temperatura externa en sistemas de Aire acondicionado (AC); 2. Desarrollo de técnicas de control en un AC tipo mini-Split; 3. Análisis de resultados de la eficiencia del AC con la técnica de control aplicada.

La elección de un aire acondicionado tipo mini-split para la implementación de este proyecto, se debió a que es un equipo de uso generalizado en hogares y recintos pequeños, lo que permite ampliar el impacto de los resultados.

La implementación de la investigación se llevará a cabo en la empresa Gerakion Tech Group S.A.S.

8.1. Análisis del estado de la literatura

En esta fase se analizó la incidencia de la temperatura externa en el funcionamiento de los sistemas AC, y se identificaron las variables de mayor interés para el contexto investigativo. Para ello, se estudiaron los resultados publicados en el estado de la literatura sobre técnicas de control en sistemas de aire acondicionado, especialmente aquellos con lazos que involucran la temperatura externa. Lo anterior implicó la búsqueda de fuentes bibliográficas confiables en bases de datos como IEEE, SCOPUS y Google Scholar.

8.2. Desarrollo de las técnicas de control

Con la información obtenida de la fase anterior se determinó que la plataforma de hardware y software a usar es Arduino, y se determinaron tres pasos para el desarrollo de las técnicas de control:

8.2.1. Desarrollo del monitoreo

Se escogieron los sensores de acuerdo con las variables identificadas en la revisión de la literatura. Para la programación del monitoreo se usaron las siguientes librerías: EmonLib (OpenEnergyMonitor, n.d.-a) para el monitoreo de variables eléctricas, y DHTLib para el monitoreo de variables ambientales (Adafruit, n.d.-b).

8.2.2. Implementación del monitoreo

Se implementó el monitoreo de las variables de interés y se determinó la incidencia de la temperatura externa en el comportamiento del AC antes de la implementación del control.

8.2.3. Análisis de Regresión Lineal

Con la información obtenida del monitoreo inicial se aplicó un modelo de Regresión Lineal Simple (RLS) a través de Excel, que correlacionó la incidencia de la temperatura externa en la temperatura interna del recinto cuando el AC se encuentra en funcionamiento. Este análisis de regresión determinó la forma en que se relaciona la temperatura externa con el comportamiento del AC.

8.2.4. Desarrollo e implementación del control

Luego del paso anterior se desarrollaron e implementaron las técnicas de control: Lineal y la combinación PI, incorporando la temperatura externa en el lazo. Para la programación de las técnicas de control se usó la librería PID (Brett Beauregard, n.d.). En este paso se desarrolló un elemento actuador no invasivo para controlar el AC, a partir de

los códigos infrarrojos (IR) del control remoto del aire acondicionado, usando la librería IRremote (AnalysIR, n.d.; Shirriff, n.d.).

8.3. Evaluación del consumo energético

En esta fase se registraron y analizaron los resultados obtenidos del monitoreo de las variables de interés en dos situaciones: antes de la implementación de las técnicas de control, y durante la implementación de estas. Lo que permitió evaluar el consumo energético del AC mini-split, en las dos situaciones anteriores; buscando establecer si las técnicas de control mejoran la eficiencia del sistema, y destacando la más efectiva para esta aplicación específica.

Desarrollo

9. Desarrollo de la solución

9.1. Selección del aire acondicionado

Las características del aire acondicionado seleccionado son las siguientes:

Tabla 4.

Características del AC seleccionado

Aire acondicionado	
Marca	HACEB
Modelo	AAASS09INV220BL
Tipo	Mini-Split Inverter
Capacidad de enfriamiento	9000 BTU
Tiempo de servicio	2 años
Periodicidad del mantenimiento	6 meses
Voltaje nominal	220V
Corriente nominal	3.7A
Potencia nominal	7.54W
Refrigerante	R410A
Volumen de aire	500m ³ /h (Vel. Máx.)
Volumen del recinto	84.6m ³

Fuente: elaboración propia.

9.2. Consideraciones del análisis de la literatura

Para el desarrollo de la solución se identificaron dos conjuntos variables:

Variables eléctricas: corriente y tensión consumidas por el AC.

Variables Ambientales: temperatura y humedad del recinto a climatizar y del medio ambiente (Temperatura y humedad externa).

Estas son las variables que se consideraron de interés puesto que en la literatura consultada son las que más se tienen en cuenta, salvo en el caso de la temperatura y humedad externa, que poco se consideran cuando se trata de aplicar control a sistemas AC.

La temperatura y humedad externa se tomaron en cuenta para el desarrollo de esta solución por para aportar un nuevo enfoque investigativo frente a las ya avanzadas investigaciones sobre eficiencia energética en sistemas de AC.

9.3. Arquitectura de la solución.

Para la consecución del objetivo general y tomando en consideración la tendencia del estado de la literatura, se planteó la arquitectura que se muestra en la Figura 21. Arquitectura de la solución. Figura 21. En este diagrama se evidencia la medición de las variables de interés para este proyecto, el registro y visualización de los datos obtenidos para su análisis, y la ejecución del control a partir de la determinación de un Set-Point ideal.

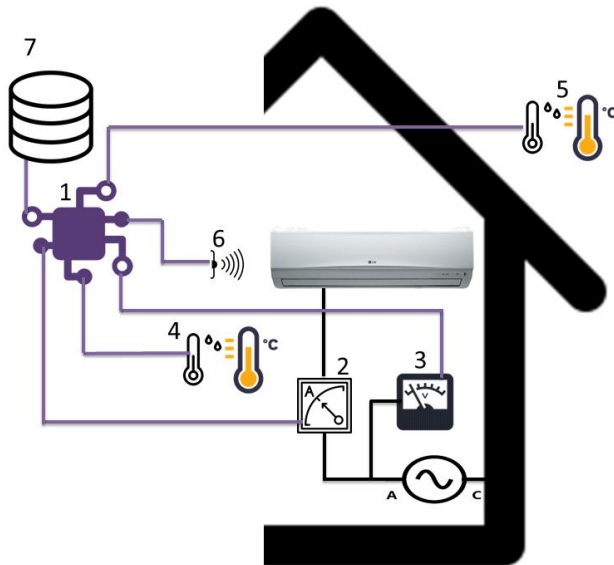


Figura 21. Arquitectura de la solución. Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se describe la función de cada elemento.

1. Controlador: este dispositivo es donde se centralizan las funciones de monitoreo y control. Realiza las mediciones a través de los sensores, registra los datos de las mediciones en una base de datos local, y controla el AC a través de un actuador infrarrojo.

2. Sensor de corriente: este dispositivo es usado para medir la intensidad de corriente consumida por el AC.

3. Sensor de Tensión: Este dispositivo sirve para medir la tensión a la cual está conectado el AC. Esta variable y la anterior son importantes para calcular la potencia consumida por el AC.

4. Sensor de temperatura y humedad interna: Este dispositivo se usa para medir la temperatura y humedad al interior del recinto que se quiere climatizar.

5. Sensor de temperatura y humedad externa: este dispositivo es usado para medir la temperatura externa al recinto que se desea climatizar, es decir, la temperatura y humedad del medio ambiente.

6. Actuador IR: Este elemento permite controlar el AC sin necesidad de intervenir en los circuitos internos, a través de utilización de los códigos infrarrojos (IR) del control remoto.

7. Base de datos: Este elemento permite almacenar los datos recolectados por los sensores del sistema. Lo anterior garantiza acceso al histórico de los datos, para realizar el análisis de estos.

9.4. Desarrollo del sistema de control

En esta sección describe el diseño y funcionamiento del sistema de control implementado en el AC tipo mini-split que se seleccionó.

El sistema de control cuenta con dos funciones específicas: Monitoreo y Control. Fue desarrollado sobre la plataforma Arduino, por consiguiente, los dispositivos usados para realizar las funciones del sistema son las compatibles con esta plataforma. El modelo

sobre el que se desarrolló e implementó la solución es la placa Arduino Mega2560, la cual ejecuta las dos funciones mencionadas.

9.4.1. Desarrollo del monitoreo

El monitoreo aporta información sobre dos procesos importantes: 1. conocer el comportamiento del AC cuando no se le aplica control, determinando así la influencia de la temperatura externa en el sistema; y 2. validar que al aplicar control externo sobre el AC se mejora su consumo energético. Esta función captura y almacena los valores de las variables de temperatura y humedad (externa e interna) del recinto, tensión de entrada al AC, y corriente consumida por el mismo.

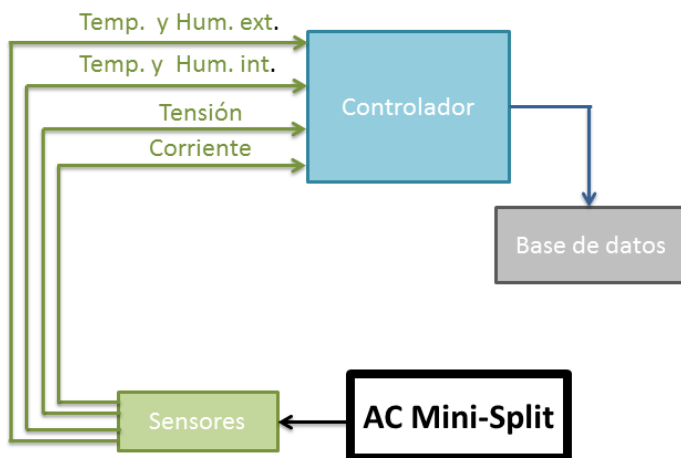


Figura 22. Diagrama de la función de monitoreo. Fuente: elaboración propia.

La función de monitoreo debe cumplir con la lógica descrita en la Figura 23.

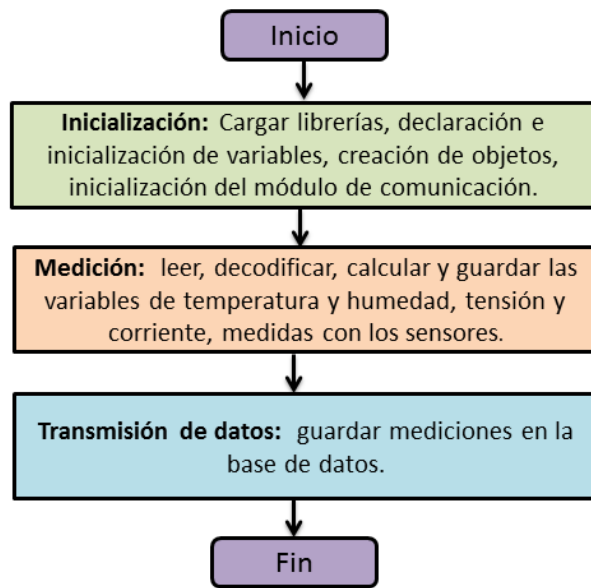


Figura 23. Lógica de la función de monitoreo. Fuente: elaboración propia.

A continuación, se describen los elementos que componen la función de monitoreo:

9.4.1.1. Sensor de corriente

El sensor de corriente que se usó es el ECS1030L72. Con este dispositivo no es necesario cortar las líneas de alimentación del AC para medir la corriente consumida. La salida de este sensor es analógica, por consiguiente, debe ser conectada al puerto de entrada analógico de la placa Arduino.

Para conectar este sensor a la placa Arduino se debe usar un circuito de acoplamiento de señal, debido a que la salida de señal del sensor es de tipo alterna y de muy baja potencia. Por lo anterior, el acoplamiento consiste en amplificar y dar un valor de Off-Set a la señal de salida del sensor, para que la placa Arduino “lea” correctamente esta señal. Lo dicho se expresa mejor en la Figura 24.

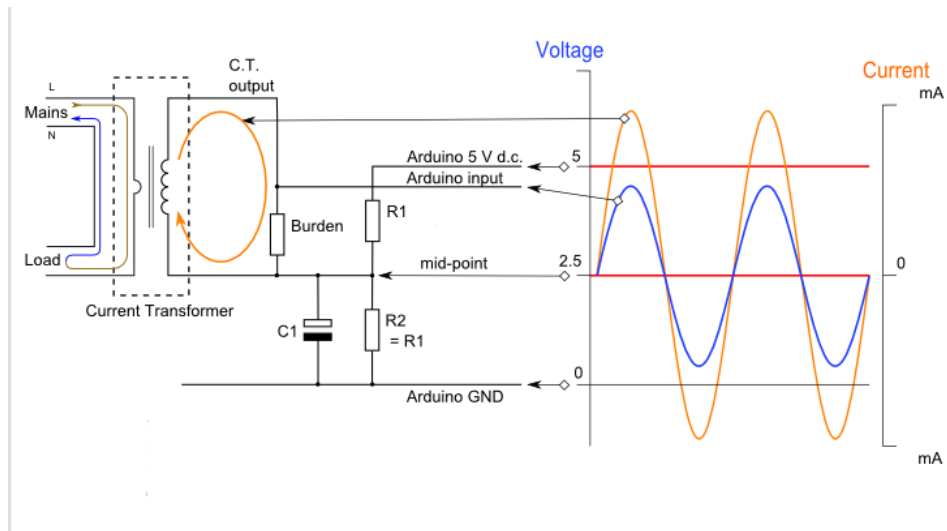


Figura 24, Circuito de acoplamiento del sensor de corriente. Fuente: adaptado de <https://learn.openenergymonitor.org/electricity-monitoring/ct-sensors/interface-with-arduino>

El rango de medición del sensor ECS1030L72 es de $0A_{rms}$ a $30A_{rms}$, por tal razón la corriente pico que podría circular por el primario de este sensor sin dañarse sería:

$$I_{1P} = I_{rms} \times \sqrt{2} = 30A \times \sqrt{2} = 42.426A$$

Sabiendo por la hoja de datos de este sensor, que su relación de transformación es de 1/2000, se procede a calcular la corriente pico que circularía por el secundario:

$$I_{2P} = \frac{I_{1P}}{2000} = \frac{42.426A}{2000} = 0.0212A$$

Para garantizar que el Arduino pueda tomar una muestra de cualquier parte de la señal que otorga el sensor de corriente, es necesario que la tensión a través de la resistencia de carga (Burden en la Figura 24), cuando la atraviese la corriente pico, sea igual a la mitad de la tensión de referencia para las entradas analógicas (AREF) de la placa Arduino Mega2560. Según la hoja de datos de la placa Arduino Mega2560, el AREF es de 5V por defecto, a menos que se use e indique otra tensión a través del pin AREF y la función `analogReference()`.

Para esta aplicación se usó el AREF por defecto. Por tanto, la resistencia de carga (R_c) ideal correspondería a:

$$R_c = \frac{\frac{AREF}{2}}{I_{2P}} = \frac{2.5V}{0.0212A} = 117.85\Omega$$

Como una resistencia de valor 117.85Ω no es comercial, se puede usar una resistencia de 100Ω o una de 120Ω . Se escogió una de resistencia de $120\Omega \pm 5\% \frac{1}{2}W$.

Debido al carácter alterno de la señal de salida del sensor de corriente, si se conectara una terminal del sensor a 0V y la otra al pin analógico del Arduino, la señal variaría entre valores positivos y negativos, en consecuencia, el Arduino no “leería” los valores negativos de la señal, ya que sólo admite valores positivos. Por lo anterior es necesaria la adición de una tensión de Offset, que ubique la señal de salida en el primer cuadrante del plano cartesiano (ver Figura 24). Esta tensión de Offset se puede conseguir a través de la configuración de un sumador de tensión con resistencias iguales, para que la señal tenga siempre valores positivos, como se muestra en la Figura 24. Para los valores de resistencia R_1 y R_2 , este divisor de tensión que otorga un voltaje Offset igual a la mitad del AREF, se elige un par de resistencias iguales de alto valor para disminuir el consumo de corriente del sistema cuando está en reposo. Por tanto:

$$R_1 = R_2 = 6.2M\Omega$$

Los cálculos y las consideraciones aquí presentadas fueron guiados por el desarrollo de OpenEnergyMonitor, n.d.-b.

9.4.1.2. Sensor de tensión

Este sensor es básicamente un transformador reductor de tensión, al cual se le adaptó un circuito de rectificación de onda completa y divisor de tensión, para su acoplamiento con la placa Arduino. La salida de este sensor es analógica, por ende, debe conectarse al puerto de entrada analógico del Arduino.

El primario del transformador se conecta en paralelo con la alimentación del Aire acondicionado (AC), su función es tomar una muestra del valor de tensión que alimenta al AC y entregarla a un circuito de acoplamiento entre el transformador y la placa Arduino Mega2560. En la Figura 25 se muestra el circuito de acoplamiento.

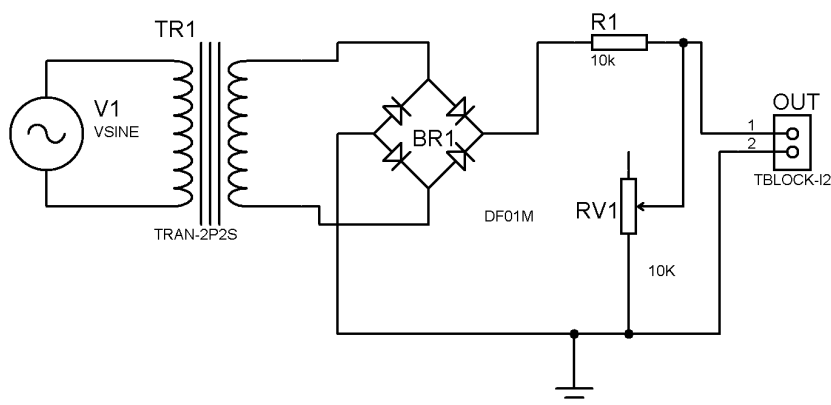


Figura 25. Circuito de acoplamiento sensor de tensión. Fuente: elaboración propia.

Las etapas para la medición de tensión son las siguientes:

- a. Reducción de tensión: en esta etapa se usa un transformador reductor con relación de transformación 120/24Vac. Esta máquina eléctrica reduce la tensión de la línea de distribución doméstica, para adaptar esta señal de tensión a valores que puedan ser manejados por la placa Arduino Mega2560.

- b. Rectificación: se usa un rectificador de onda completa (puente de diodos), que soporta 1A. Es necesario rectificar esta señal, ya que el puerto analógico del Arduino sólo admite valores positivos de señal: 0Vdc a 5Vdc. Al rectificar la señal otorgada por el transformador se logra que al Arduino sólo lea valores positivos de la señal.
- c. Escalado: en esta etapa se usa un divisor de tensión entre una resistencia de valor fijo y una de valor variable (ver Figura 25), con lo que se logra ajustar manualmente la amplitud de la señal de salida hasta un valor de tensión que no dañe la placa Arduino. Este valor de tensión no debe superar los 5Vdc cuando en el primario del transformador exista el valor pico de tensión, por tanto, se ajusta la salida de este circuito para que a la salida exista una tensión igual a 2,5Vdc cuando la tensión máxima en el primario del transformador sea 127Vac. Lo anterior como medida de seguridad, por si existe oscilación de tensión igual al doble de la tensión nominal de distribución doméstica que pueda dañar la placa Arduino.

En la Figura 25 se observa que V1 representa la alimentación del aire acondicionado, TR1 es el transformador reductor de tensión, BR1 es el puente rectificador de onda completa, y las resistencias R1 y RV1 conforman el divisor de tensión.

Algunas consideraciones aquí presentadas fueron guiados por el desarrollo de OpenEnergyMonitor, n.d.

9.4.1.3. Sensor de temperatura y humedad

Para medir las variables de temperatura y humedad se usaron dos DHT11, para medir la temperatura y humedad del recinto a climatizar y del ambiente externo a este recinto. Para la implementación de este tipo de sensores en la plataforma Arduino, es necesario hacer uso de la librería DHT (Adafruit, n.d.-b). Esta librería permite usar intuitivamente los sensores DHT.

9.4.1.4. Base de datos.

Para crear la base de datos se usa un módulo de almacenamiento local conocido como Datalogger. Esta base de datos se considera de almacenamiento local, puesto que el Datalogger se incrusta a la placa Arduino. Este dispositivo organiza los datos del monitoreo en una base de datos con formato de texto plano. El almacenamiento de la base de datos se lleva a cabo en una memoria SD, y cada serie de datos se almacena con la etiqueta de fecha y hora, gracias al reloj en tiempo real (RTC, del inglés *Real time Clock*) que integra el Datalogger. (Adafruit, n.d.-a)

A partir de lo anterior se definió que el sistema de monitoreo almacene cada un minuto los datos medidos a través de los sensores anteriormente descritos.

9.4.2. Desarrollo del control

La función de control es determinar el set-point adecuado para el AC, de acuerdo con el estado de la temperatura externa. La lógica que sigue la función de control dependerá de un análisis de Regresión Lineal Simple (RLS), que se realizará previo a la implementación de estas técnicas de control, y con el cual se modelará la relación entre el

comportamiento de la temperatura externa y la interna cuando el AC se encuentra en funcionamiento.

La arquitectura de la función de control al implementar el control Lineal y PI es la que se muestra en la, y respectivamente.

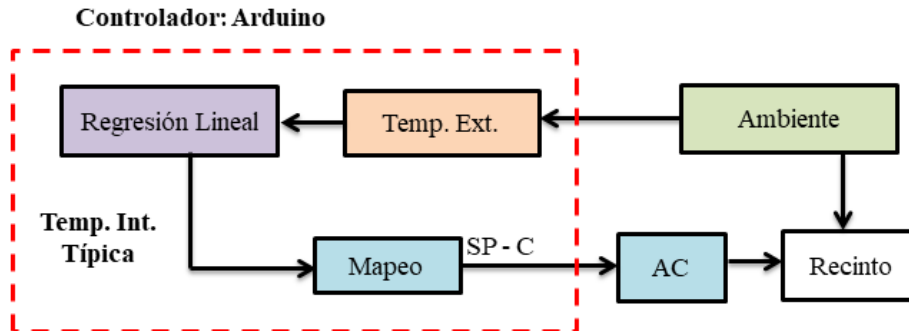


Figura 26. Arquitectura de la técnica de control Lineal. Fuente: elaboración propia.

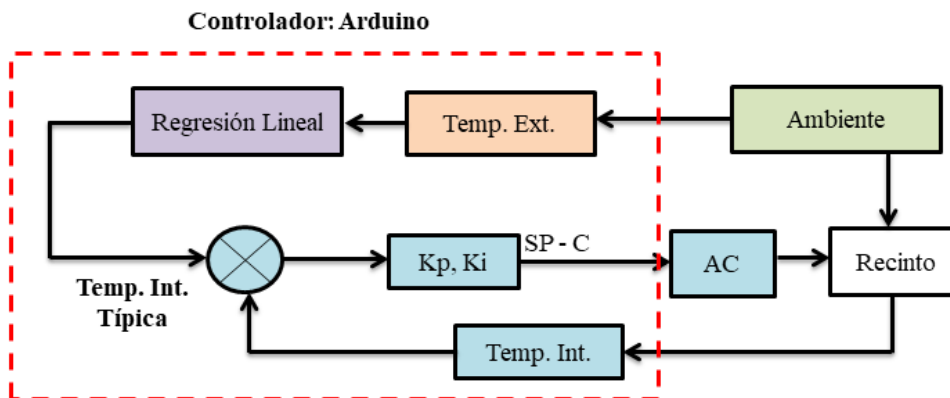


Figura 27. Arquitectura de la técnica de control PI. Fuente: elaboración propia.

Para el desarrollo de las técnicas de control no se tuvo en cuenta la combinación PID, debido a que los procesos donde la temperatura es la variable controlada, los tiempos de respuesta son muy largos, por lo tanto el control derivativo se hace ineficaz (Ogata, 2010a).

9.4.2.1. Actuador infrarrojo

Este elemento es un led infrarrojo (led IR) conectado al Arduino Mega2560, que transmite en código infrarrojo (código IR) el set-point ideal. El circuito que transmite los códigos IR (Actuador IR) es el que se muestra en la Figura 28. Para identificar los códigos IR del AC a intervenir, se requirió de un receptor-decodificador infrarrojo (receptor IR) TSOP382, y de la librería IRremote de Arduino, con lo cual se obtuvieron los códigos IR que configuran el set-point del AC.

Debido a que el control remoto transmite toda la configuración del AC en cada comando que transmite, se tuvieron en cuenta las siguientes condiciones:

- Que siempre se va a usar el AC en modo de operación COOL.
- Que la configuración FAN Speed siempre va a ser MED.
- Que la configuración Swing siempre estará apagada.

Luego de configurar cada una de las anteriores condiciones se procedió a grabar el código IR del comando de encendido y de cada uno de los set-points posibles en el AC mini-split seleccionado, empezando desde 17°C hasta 30°C.

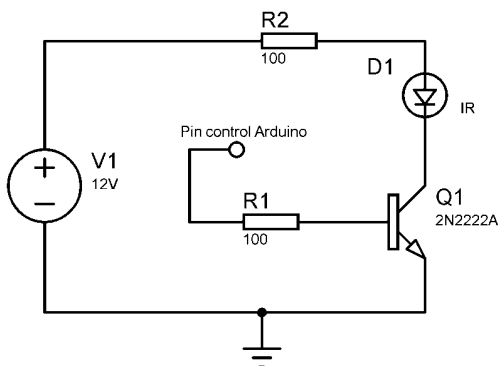


Figura 28. Circuito Actuador IR. Fuente: elaboración propia.



Figura 29. (a) Emisor IR. (b) Receptor-decodificador IR. Fuente: adaptado de

<https://www.vishay.com/docs/82489/tsop322.pdf> y <http://www.datasheetcafe.com/ttl32-datasheet-led-diode/>

Resultados

10. Análisis y discusión de los resultados

En esta sección se describen los resultados obtenidos del análisis, el diseño e implementación de la solución planteada en la sección anterior.

10.1. Análisis del estado de la literatura

A continuación, se presenta un cuadro resumen de los datos técnicos más relevantes de las fuentes consultadas para la elaboración de los antecedentes de esta investigación (ver Tabla 5).

Se puede observar que siete de las trece fuentes consultadas comparan los resultados obtenidos al aplicar una técnica de control clásico con otras técnicas de control más avanzado en un sistema de climatización o equipo de climatización. Se evidencian en estudios como el de Jun & Kanyu (2011) que las técnicas de control clásico aún tienen vigencia aplicativa, por ejemplo, implementado un algoritmo inteligente para optimizar los parámetros de un controlador PID y mejorar su desempeño.

A partir del análisis de la literatura realizado, se reconoce que las variables de mayor relevancia en los avances investigativos concernientes a sistemas de AC son: la Temperatura interna y externa, la humedad interna y externa, la ocupación del lugar a climatizar, y la potencia eléctrica consumida por el AC. Ésta última variable es la que mayormente debe preocupar a usuarios, proveedores e investigadores, puesto que se ve afectada por otras variables. Todos los trabajos consultados en esta investigación van enfocados al mejoramiento del consumo energético de los sistemas de AC, debido a que un

consumo elevado de energía supone un impacto ambiental negativo al planeta, y pérdidas económicas a los usuarios y proveedores de estos sistemas.

Por lo tanto, se considera que las variables de mayor relevancia para la implementación y prueba de las técnicas de control clásico, en esta investigación se dividen en dos grupos:

Variables eléctricas: corriente y tensión consumidas por el AC.

Variables Ambientales: temperatura y humedad del recinto a climatizar y del medio ambiente (Temperatura y humedad externa).

Tabla 5.

Datos técnicos revisión de la literatura.

Año	Título	Tipo de Artículo/Patente/Conferencia	Técnica de Control	Variables de Interés				
				A*	B*	C*	D*	E*
2015	Model-based Temperature and Humidity Control of Paint Booth HVAC Systems	Simulación	Feed-forward compensation	x	x	x	x	
2015	Control Strategy Optimization for Energy Efficiency and Comfort Management in HVAC Systems	Caso de estudio	Particle swarm optimizer vs On-Off	x	x			x
2014	Energy-efficient fuzzy model-based multivariable predictive control of a HVAC system	Implementación	Fuzzy-control predictivo	x	x		x	
2014	Energy Efficient HVAC System with Distributed Sensing and Control	Implementación	PID		x		x	
2014	Energy Efficient and Effective Control Strategy of HVAC System in Large Shopping Complex	Diseño	Control adaptativo		x			x

2014	Cost-effective Air Conditioning Control Considering Comfort Level and User Location.	Implementación	PMV index	x		x	x
2014	Multi-objective optimal control algorithm for HVAC based on particle swarm optimization	Implementación	Particle Swarm optimization	x	x		
2013	Model Predictive Control of Chilled Water Temperature for Centralized HVAC Systems	Diseño	Control predictivo		x		
2012	A Review of Intelligent Control Techniques in HVAC Systems	Revisión de la literatura	Fuzzy-NeuralNetwork, NeuroFuzzy-Optimal NeuralNetwork for PID				
2012	Estudio Experimental de las Estrategias de Control On-Off y Control Continuo en un Sistema de Refrigeración	Implementación	On-Off, Fuzzy, PID, Proporcional		x		
2011	A particle Swarm Optimization approach for optimal design of PID controller for temperature control in HVAC	Simulación	Particle Swarm optimization-PID		x		
2010	A sliding mode control of discharge air temperature in automotive HVAC using nonlinear sliding surface in input-delay system	Simulación	Control de modo deslizante del PID-PI		x		
2009	An expert system for the humidity and temperature control in HVAC systems using ANFIS and optimization with Fuzzy Modeling Approach	Implementación	ANFIS, Fuzzy, PID, predictivo	x	x	x	x

* (A) Temperatura Externa, (B) Temperatura Interna, (C) Humedad Externa, (D) Humedad Interna, (E)

Ocupancy. Fuente: elaboración propia.

Se identifica que, en los estudios analizados, son pocas las investigaciones que incluyen la temperatura y la humedad externa como una variable en el sistema de control. Sólo 4 de las 13 investigaciones emplean la temperatura externa dentro del análisis de la técnica de control, sustentando así la importancia de esta investigación, en tanto que se está aportando una experiencia investigativa a la literatura, e incentivando a que este nuevo enfoque traiga nuevos resultados con la colaboración de otros investigadores.

10.2. Sistema de control

El sistema de control se compone de las partes de hardware descritas en la sección 9, y se puede apreciar en la Figura 30.



Figura 30. Prototipo. Fuente: elaboración propia

10.2.1.1. Monitoreo previo a la implementación del control

En la Figura 31 se puede apreciar el comportamiento de las variables consideradas en esta investigación. De este comportamiento es posible ver que en las horas donde la temperatura externa alcanza sus valores más altos, la temperatura interna y la corriente también alcanzan sus valores pico. De esta manera, antes de hacer un análisis exhaustivo de los datos, se puede identificar que estas tres variables están relacionadas directamente entre sí.

Por lo que se evidencia de los datos recolectados, se puede inferir que en las horas donde la temperatura externa es mayor el sistema AC consume mayor corriente, y por ende su potencia de consumo es mayor.

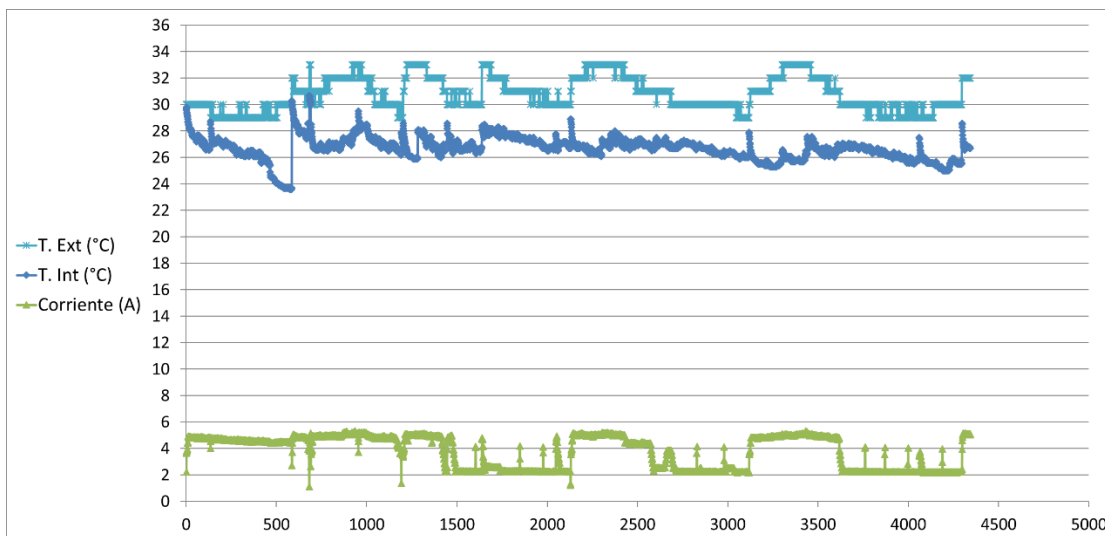


Figura 31. Resultados del Monitoreo inicial. Fuente: elaboración propia.

10.2.2. Análisis estadístico de los datos del monitoreo

Para confirmar la inferencia de que la temperatura externa afecta directamente a la temperatura interna y el consumo de corriente del AC, se aplicó un análisis de Regresión Lineal Simple (RLS), implementado en Microsoft Excel. En este análisis RLS se consideró

a la temperatura externa como la variable independiente y como variables dependientes a la temperatura interna y la corriente consumida por el AC. Del anterior análisis se obtuvieron dos modelos RLS, uno donde se correlacionan la temperatura externa y la temperatura interna, y otro donde se correlacionan la temperatura externa y la corriente.

10.2.2.1. Correlación temperatura externa e interna

Tabla 6.

Resumen del Análisis RLS entre la temperatura externa y la interna.

Coeficiente de correlación múltiple			0,416790663			
Coeficiente de determinación R^2			0,173714456			
R^2 ajustado			0,173577948			
Error típico			0,862992936			
Observaciones			6055			
ANÁLISIS DE VARIANZA						
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F	
Regresión	1	947,7438235	947,7438235	1272,554764	3,8467E-253	
Residuos	6053	4508,012956	0,744756808			
Total	6054	5455,75678				
	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%
Intercepción	22,17731017	0,133366915	166,2879445	0	21,91586355	22,43875679
T. Ext (°C)	0,146954358	0,004119497	35,67288556	3,85E-253	0,138878677	0,155030039

Fuente: elaboración propia.

Los resultados del análisis para la correlación de la temperatura externa e interna son los mostrados en la Tabla 6, y sugieren la siguiente interpretación:

1. El Coeficiente de Correlación Múltiple es mayor que 0, esto indica que las temperatura interna y externa se relacionan directamente.

2. El Coeficiente de Determinación R^2 es 0,173714456, e indica el porcentaje de adaptación del modelo RLS a los datos proporcionados, es decir que el modelo obtenido se ajusta sólo al 17% de las muestras procesadas.
3. De acuerdo con la forma general del modelo RLS, el comportamiento de la temperatura interna teniendo en cuenta la temperatura externa se puede modelar con la siguiente ecuación:

$$T. Int. = 22,17731017 + 0,146954358(T. Ext.)$$

4. De los resultados del análisis RLS se observa que el indicador de probabilidad es 0 para la intersección y $3,85 \times 10^{-253}$ para la pendiente, es decir prácticamente 0, por lo tanto, es imposible rechazar los valores que arrojó el modelo RLS para estas constantes.

10.2.2.2. Correlación temperatura externa y consumo

Tabla 7.

Resumen del Análisis RLS entre la temperatura externa y la corriente.

Coeficiente de correlación múltiple			0,465472597			
Coeficiente de determinación R^2			0,216664738			
R^2 ajustado			0,216535325			
Error típico			1,107709562			
Observaciones			6055			
ANÁLISIS DE VARIANZA						
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F	
Regresión	1	2054,296106	2054,296106	1674,215018	0	
Residuos	6053	7427,154932	1,227020474			
Total	6054	9481,451038				
	Coeficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%
Intercepción	-2,9639894	0,171185419	-17,3144972	1,36265E-65	-3,2995737	-2,6284050
T. Ext (°C)	0,216355784	0,005287652	40,91717266	0	0,205990104	0,226721465

Fuente: elaboración propia.

Los resultados del análisis para la correlación de la temperatura externa e interna son los mostrados en la Tabla 7, y sugieren la siguiente interpretación:

1. El Coeficiente de Correlación Múltiple es mayor que 0, esto indica que la temperatura externa y la corriente consumida por el AC se relacionan directamente.
2. El Coeficiente de Determinación R^2 es 0,216664738, es decir, que el modelo obtenido se ajusta sólo al 21% de las muestras procesadas.
3. De acuerdo con la forma general del modelo RLS, el comportamiento de la corriente consumida por el AC, teniendo en cuenta la temperatura externa se puede modelar con la siguiente ecuación:

$$\text{Corriente} = -2,9639894 + 0,216355784(T. \text{Ext.})$$

4. De los resultados del análisis RLS se observa que el indicador de probabilidad es 0 para la pendiente y $1,36265 \times 10^{-65}$ para la intersección, es decir prácticamente 0, por lo tanto, es imposible rechazar los valores que arrojó el modelo RLS para estas constantes.

De acuerdo con lo analizado en las secciones 10.2.2.1 y 10.2.2.2, es posible determinar que sí existe una relación directa entre la temperatura externa, la temperatura interna y el consumo de un sistema AC. Con lo anterior, es posible afirmar que en un recinto cerrado en el que funciona un sistema AC, cuando exista un aumento en la temperatura externa al recinto, se verá afectada directamente la temperatura interna del recinto y por consiguiente el sistema AC presentará un mayor consumo de corriente.

10.2.3. Técnicas de control

Al obtener el modelo RLS se pudo diseñar las técnicas de control para el AC seleccionado. A continuación, se describen los resultados del diseño y la implementación de las técnicas de control

10.2.3.1. Técnica de Control Lineal

La ecuación obtenida del modelo RLS para la correlación de la temperatura externa e interna:

$$T.Int. = 22,17731017 + 0,146954358(T.Ext.)$$

Se usa para calcular lo que de ahora en adelante se denomina temperatura interna típica (Tit). Según el modelo RLS, esta es la temperatura interna que existe típicamente en el recinto para cada valor de la temperatura externa obtenido experimentalmente.

En esta técnica de control, el valor de la Tit se mapea en el rango de los valores de Set-Point admitidos por el AC. Estos valores de Set-Point van desde 17°C hasta 24°C. El valor resultante del mapeo de la Tit se denomina Set-Point Calculado (Spc). Este valor de Spc se transmite al AC a través del actuador infrarrojo descrito en la sección 9.4.2.1. El esquema de control de esta técnica es el que se muestra en la Figura 32.

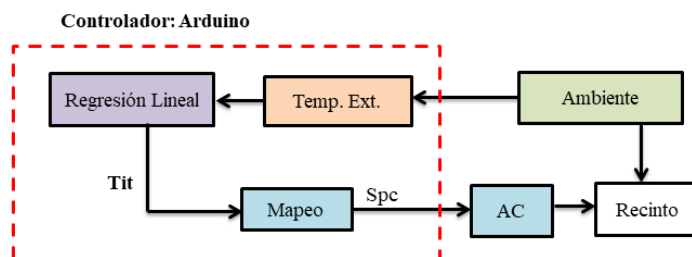


Figura 32. Esquema del Controlador Lineal. Fuente: elaboración propia.

Los resultados del comportamiento del sistema al aplicar este control se observan en la Figura 33. Se puede evidenciar que se mejora notablemente la estabilidad del sistema AC con relación a la corriente consumida y el estado de la temperatura interna.

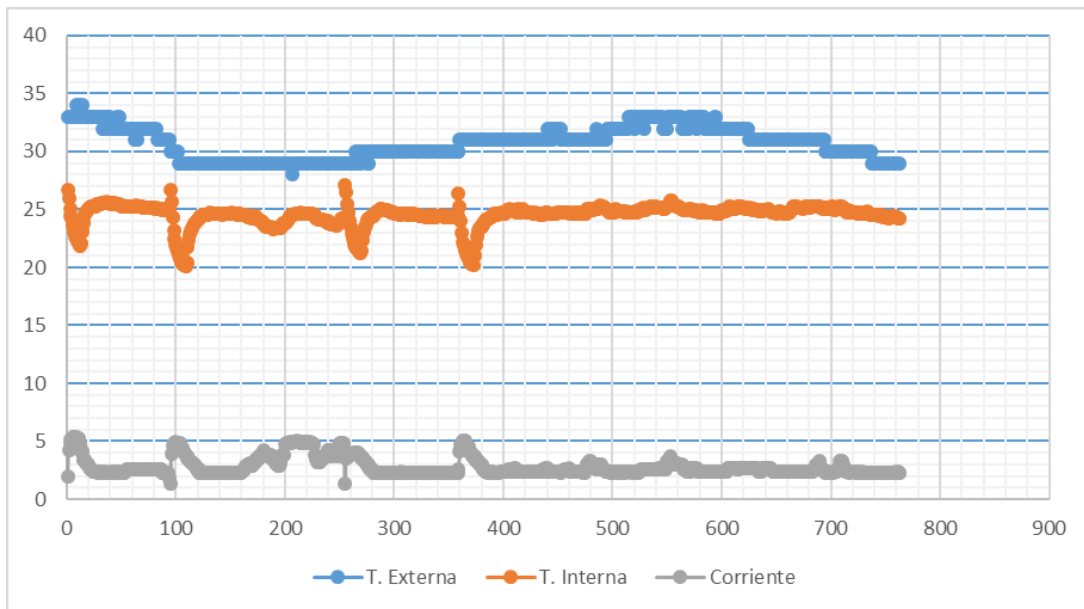


Figura 33. Comportamiento del sistema al aplicar Control Lineal. Fuente: elaboración propia.

10.2.3.2. Técnica de Control PI

En la técnica de control PI se usó la variable Tit, para ajustar constantemente el valor del Set-Point de este controlador. Como variable de realimentación para el controlador se usó la temperatura interna y la salida se situó en los límites de 17°C a 24°C.

Los parámetros K_p y K_i del controlador se ajustaron empíricamente a través de simulaciones. El esquema del controlador PI es el que se muestra en la Figura 34.

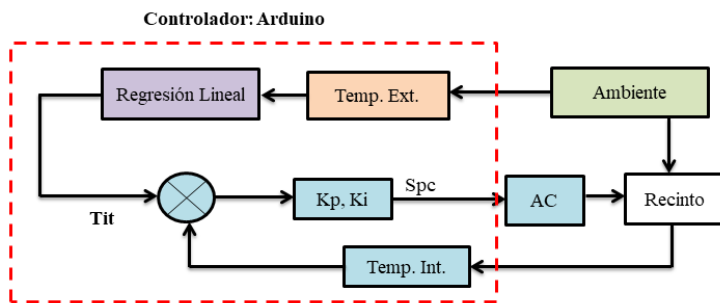


Figura 34. Esquema del controlador PI. Fuente: elaboración propia.

Los resultados del comportamiento del sistema al aplicar este control se observan en la Figura 35. Se puede evidenciar que se mejora notablemente la estabilidad del sistema AC con relación a la corriente consumida y el estado de la temperatura interna.

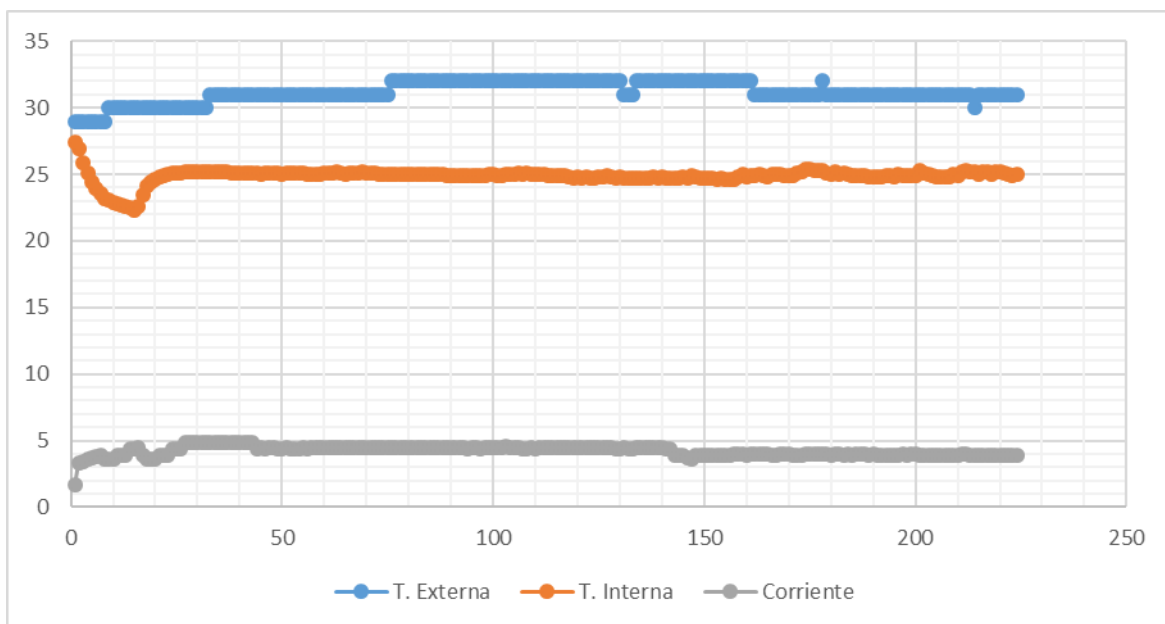


Figura 35. Comportamiento del sistema al aplicar Control PI. Fuente: elaboración propia.

Se puede observar que este tipo de control también mejora la estabilidad del sistema ante los cambios de la temperatura externa.

10.3. Verificación del consumo energético

En la Figura 36 se presenta el consumo de energía en kilovatios por hora (kW/h), del sistema AC antes de la implementación del control, y en la implementación del control Lineal y PI. Se evidencia que el control Lineal disminuyó en un 23% el consumo energético del AC, mientras que el control PI lo redujo en un 16%, en comparación con el sistema sin control. A pesar de que el modelo RLS sólo se ajustaba para el 17% de las muestras procesadas, se tuvo una respuesta positiva del modelo, en términos de la mejora del consumo energético del AC.

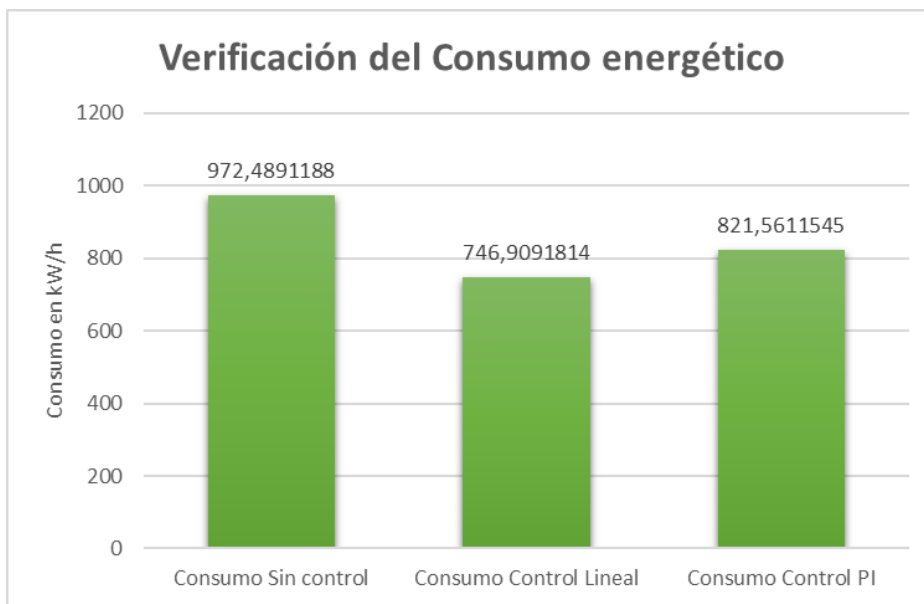


Figura 36. Verificación del Consumo energético. Fuente: elaboración propia.

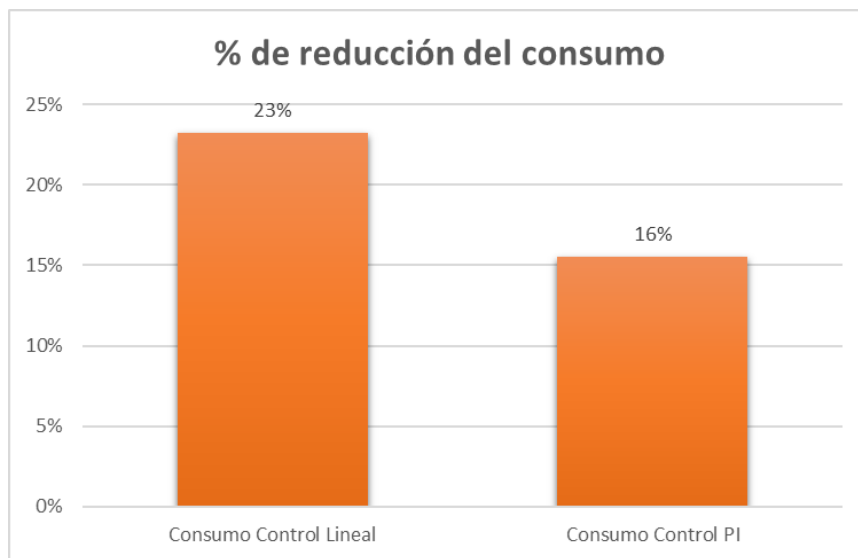


Figura 37. Comparación entre técnicas de control. Fuente: elaboración propia.

Conclusiones

En la búsqueda de satisfacer el objetivo general de este proyecto de investigación, se obtuvieron los siguientes hallazgos y conclusiones:

La aplicación de dos técnicas de control clásico que involucran la temperatura externa en el lazo de control en un sistema de Aire Acondicionado (AC) tipo mini-split permiten mejorar el consumo de energía del equipo.

En el estado actual de la literatura se evidencia que son pocos los estudios y aplicaciones que tienen en cuenta la temperatura externa como variable de importancia para mejorar la eficiencia de sistemas AC.

En esta investigación se verificó que existe una relación directa entre la temperatura externa y el consumo de energía de un sistema AC, a través de un análisis de Regresión Lineal Simple (RLS) correlacionando la temperatura externa con las variables de temperatura interna y corriente consumida por el AC.

Aplicando un control Lineal para ajustar el set-point de un sistema AC tipo mini-split, dependiendo de los cambios de la temperatura externa permitió mejorar el consumo de energía del AC. Aplicando un control Lineal se obtuvo una mejora del 23% en el consumo energético, mientras que aplicando un control PI se obtuvo una reducción del 16% en el consumo de energía.

Trabajos futuros

El presente proyecto puede extenderse a la profundización en las siguientes aplicaciones:

Como trabajo a corto plazo es necesario validar la repetibilidad de los resultados obtenidos en el presente proyecto, a través del diseño de una investigación de tipo Desarrollo Experimental.

Otro trabajo a corto plazo es incluir el set-point del usuario en el lazo, para tomar la decisión de control con base en la comparación entre el set-point del usuario y el set-point calculado y. De esta manera se tendría una aplicación más amigable con el usuario del AC.

Como trabajos a mediano y largo plazo se podrían desarrollar nuevas investigaciones que implementen otras técnicas de control, tales como control Difuso o control adaptativo. También se podría profundizar en la aplicación de algoritmos inteligentes como Colonia de hormigas, enjambre de abejas, entre otros.

El aporte de esta investigación permitiría también ahondar en el campo de Internet de las Cosas (IoT), puesto que crea un escenario de aplicaciones que proporcionen datos en tiempo real a servidores con mayor capacidad de procesamiento, y con los cuales se pueda implementar otro tipo de control u optimización inteligente para los sistemas AC.

Referencias

- Adafruit. (n.d.-a). Adafruit Data Logger Shield | Adafruit Learning System. Retrieved November 1, 2018, from <https://learn.adafruit.com/adafruit-data-logger-shield>
- Adafruit. (n.d.-b). DHT sensor library - Arduino Libraries. Retrieved March 6, 2018, from <https://www.arduinolibraries.info/libraries/dht-sensor-library>
- Alfaro Ruíz, V. M. (2011). Ecuaciones Para Controladores Pid Universales. *Revista Ingeniería*, 12(1–2), 11–20. <https://doi.org/10.15517/ring.v12i1-2.6429>
- AnalysIR. (n.d.). Air Conditioner Record long Infrared Remote control signals - Arduino. Retrieved March 6, 2018, from <https://www.analysir.com/blog/2014/03/19/air-conditioners-problems-recording-long-infrared-remote-control-signals-arduino/>
- Arduino Playground. (n.d.-a). ¿Qué es Arduino? ~ Arduino.cl. Retrieved April 26, 2018, from <http://arduino.cl/que-es-arduino/>
- Arduino Playground. (n.d.-b). Arduino Language Structure. Retrieved April 27, 2018, from <https://playground.arduino.cc/ArduinoNotebookTraduccion/Structure>
- Arduino Reference. (n.d.). Language Reference. Retrieved April 27, 2018, from <https://www.arduino.cc/reference/en/#functions>
- Brett Beauregard. (n.d.). PID - Arduino Libraries. Retrieved March 6, 2018, from <https://www.arduinolibraries.info/libraries/pid>
- Dominguez, S., Campoy, P., & Sebastián, J. (2000). *Control en el espacio de estado*. Retrieved from <http://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=38577>
- El Ciclo de Refrigeración - Cómo Funciona. (n.d.). Retrieved November 2, 2017, from <https://tuaireacondicionado.net/el-ciclo-de-refrigeracion-como-funciona/>

- Galvéz-Arocha, O. A. (Universidad I. de S., Quiroga-Mendez, J. E. (Universidad I. de S., Barajas-Merchan, D. E. (Universidad I. de S., & Gómez-Sarmiento, M. L. (Universidad I. de S. (2012). REVISTA UIS INGENIERÍAS, Vol. 11, núm. 1 (2012), 11(2012), 1–18.
- Godo, S., Matsui, K., & Nishi, H. (2014). Cost-effective air conditioning control considering comfort level and user location. *Proceedings, IECON 2014 - 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 5344–5349.
<https://doi.org/10.1109/IECON.2014.7049316>
- Jun, Z., & Kanyu, Z. (2011). A Particle Swarm Optimization Approach for Optimal Design of PID Controller for Temperature Control in HVAC. *2011 Third International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*, 1(2), 230–233.
<https://doi.org/10.1109/ICMTMA.2011.63>
- Kuo, B. C. (1996). *Sistemas de control automático* (7th ed.). Naucalpan de Juarez, México.
- Li, C., Li, Z., Li, M., Meggers, F., Schlueter, A., & Lim, H. B. (2014). Energy Efficient HVAC System with Distributed Sensing and Control. *The 34th International Conference on Distributed Computing Systems*, 10.
<https://doi.org/10.1109/ICDCS.2014.51>
- Li, J., Wall, J., & Platt, G. (2010). Indoor air quality control of HVAC system. *Proceedings of the 2010 International Conference on Modelling, Identification and Control*, 756–761.
- Lu, L., Cai, W., Xie, L., Li, S., & Soh, Y. C. (2005). HVAC system optimization - In-building section. *Energy and Buildings*, 37(1), 11–22.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2003.12.007>

- Mazzone, V. (2012). Controladores PID. *Universidad Nacional de Quilmes*, 12. Retrieved from <http://www.eng.newcastle.edu.au/~jhb519/teaching/caut1/Apuntes/PID.pdf>
- Miranda, A. L. (2005). *Nueva Enciclopedia de la Climatización: Aire Acondicionado*. Barcelona: Ediciones CEAC.
- Mirinejad, H., Welch, K. C., & Spicer, L. (2012). A review of intelligent control techniques in HVAC systems, 1–5. <https://doi.org/10.1109/EnergyTech.2012.6304679>
- Mondal, A., & Bhattacharya, S. (2015). Energy Efficient and Effective Control Strategy of HVAC System in Large Shopping Complex. *Proceedings - 2014 3rd International Conference on Eco-Friendly Computing and Communication Systems, ICECCS 2014*, 116–120. <https://doi.org/10.1109/Eco-friendly.2014.99>
- Ogata, K. (2010a). *Ingeniería de control moderna*. Vasa. <https://doi.org/10.1109/ICET.2009.5353146>
- Ogata, K. (2010b). Sistemas de control en tiempo discreto. *Control Engineering*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- OpenEnergyMonitor. (n.d.-a). EmonLib - Arduino Libraries. Retrieved March 6, 2018, from <https://www.arduino-libraries.info/libraries/emon-lib>
- OpenEnergyMonitor. (n.d.-b). Learn | OpenEnergyMonitor CT Sensor. Retrieved March 6, 2018, from <https://learn.openenergymonitor.org/electricity-monitoring/ct-sensors/interface-with-arduino>
- OpenEnergyMonitor. (n.d.-c). Learn | OpenEnergyMonitor Voltage sensor. Retrieved March 6, 2018, from <https://learn.openenergymonitor.org/electricity-monitoring/voltage-sensing/measuring-voltage-with-an-acac-power-adapter>
- Preglej, A., Rehrl, J., Schwingshackl, D., Steiner, I., Horn, M., & Krjanc, I. (2014).

- Energy-efficient fuzzy model-based multivariable predictive control of a HVAC system. *Energy and Buildings*, 82, 520–533.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.07.042>
- Quadri, N. P. (2001). *Sistemas de aire acondicionado: Calidad del aire interior*.
- Shirriff. (n.d.). IRremote - Arduino Libraries. Retrieved March 6, 2018, from
<https://www.arduinolibraries.info/libraries/i-rremote>
- Soyguder, S., & Alli, H. (2009). An expert system for the humidity and temperature control in HVAC systems using ANFIS and optimization with Fuzzy Modeling Approach. *Energy and Buildings*, 41(8), 814–822. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.03.003>
- Tiscornia, E., & Defelippe, A. (n.d.). Domótica: La vivienda inteligente. Retrieved June 7, 2018, from <http://www.palermo.edu/ingenieria/downloads/CyT3/CYT308.pdf>
- Torrente, Ó. (2013). *ARDUINO, Curso básico de formación*. (Alfaomega, Ed.) (Primera Ed). C.V., México D.F: Alfaomega Grupo Editor, S.A.
<https://doi.org/9788494072505>
- Walporle, R. E., Myres, R. H., Myres, S. L., & Ye, K. (2012). *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias. Ingeniería* (9th ed.). Atlacomulco, México: PEARSON EDUCACIÓN Inc.
- Whitman, William. Jhonson, W. (2006). *Tecnología De La Refrigeracion Y Aire Acondicionado - Fundamentos I* (1st ed.). Retrieved from Paraninfo Thomson Learning
- Whitman, W., & Jhonson, W. (2006). *Tecnología De La Refrigeracion Y Aire Acondicionado - Fundamentos I* (1st ed.). Paraninfo Thomson Learning.
- Yang, R., & Wang, L. (2012). Optimal control strategy for HVAC system in building

energy management. *Pes T&D 2012*, 1–8. <https://doi.org/10.1109/TDC.2012.6281687>

Yang, R., & Wang, L. (2015). Control strategy optimization for energy efficiency and comfort management in HVAC systems. *2015 IEEE Power and Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference, ISGT 2015*.
<https://doi.org/10.1109/ISGT.2015.7131863>

Zhangjun, Z. K. (2011). A Particle Swarm Optimization Approach for Optimal Design of PID Controller for Temperature Control in HVAC. *2011 Third International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, 1(2)*, 230–233.
<https://doi.org/10.1109/ICMTMA.2011.63>

Zhu, J., Yang, Q., & Lu, J. (2013). Model Predictive Control of Chilled Water Temperature for Centralized HVAC Systems. *Electrical Power & Energy Conference (EPEC), 2013 IEEE*, 1–5.